



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA**

**DISMINUCIÓN DEL CRECIMIENTO DE ANILLOS Y
TRAQUEIDAS DE *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham.
ATRIBUIBLE AL SO₂, O₃ y NO_x EN EL PARQUE NACIONAL
DESIERTO DE LOS LEONES**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

BIÓLOGA

PRESENTA:

SOLEDAD JIMÉNEZ LÓPEZ



**DIRECTOR: M. EN C. GERMÁN CALVA
VÁSQUEZ**

CIUDAD DE MÉXICO, JUNIO 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, es un orgullo pertenecer y egresar de la Máxima casa de estudios.

A la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, por brindarme un lugar dentro de ella y ofrecerme las herramientas para formarme como Bióloga, me llevo incontables recuerdos gratos de la carrera.

Al Laboratorio de Contaminación Atmosférica por permitirme pertenecer a él desde laboratorio de séptimo y octavo, y posteriormente como tesista, por convertirse en mi segundo hogar, por todas los aprendizajes y momentos memorables.

Al M. en C. Germán Calva Vásquez, mi director de tesis, por ser un excelente padre académico, por todo su apoyo, por el tiempo dedicado a esta tesis y a mi formación, por sus bastas enseñanzas y consejos, por confiar en mis capacidades incluso más que yo misma, pero, sobre todo muchas gracias por toda la paciencia.

A mis sinodales: Dra. Patricia Rivera García, M. en C. María Magdalena Ayala Hernández, Dr. Efraín Reyes Ángeles Cervantes y Dra. Esther Matiana García Amador, por el tiempo dedicado a la revisión de esta tesis, sus observaciones han sido fundamentales e imprescindibles para la misma.

Al Biól. Cristóbal Galindo Galindo por su apoyo en la realización de mi servicio social y por todas las prácticas y salidas bajo su guía.

A todos los profesores que durante mi trayectoria escolar contribuyeron a mi formación.

A la Secretaria de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México, Proyecto SECITI/103/2017, por el financiamiento que contribuyó a la realización de este trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	3
III. MARCO TEÓRICO.....	6
3.1 Bosque de oyamel.....	6
3.2 Efecto de la contaminación atmosférica a escala mundial	9
3.2.1 Dióxido de azufre (SO ₂).....	12
3.2.2 Ozono (O ₃).....	13
3.2.3 Óxidos de nitrógeno (NO _x)	14
3.3 Contaminación de la Ciudad de México	16
3.4 Dendrocronología.....	19
3.5 Anillos de crecimiento	20
3.6 Elementos celulares.....	22
3.6.1 Traqueidas.....	23
3.6.2 Xilogénesis	24
3.6.3 Lumen.....	26
3.6.4 Pared celular.....	27
IV. PROBLEMA.....	31
V. JUSTIFICACIÓN	32
VI. HIPÓTESIS	32
VII. OBJETIVOS	33
7.1 General	33
7.2 Particulares	33
VIII. ÁREA DE ESTUDIO.....	34
8.1 Localización	34
8.2 Clima	35
8.3 Edafología	36
8.4 Vegetación	36
IX. MÉTODO.....	38
9.1 Trabajo de campo	38
9.2 Trabajo de laboratorio	39
9.2.1 Tratamiento de las muestras	39

	Página
9.2.2 Análisis de las muestras	42
9.3 Trabajo de gabinete	46
X. RESULTADOS Y ANÁLISIS	47
10.1 Anillos de crecimiento de 1960 a 2015.....	47
10.2 Contaminantes del aire de la CDMX vs anillos de crecimiento	53
10.3 Ganancias	55
10.4 Numero de células	58
10.5 Longitud lumen.....	60
10.6 Longitud pared celular doble	65
10.7 Análisis de correlaciones y conglomerados	68
XI. CONCLUSIONES.....	79
XII. RECOMENDACIONES	81
XIII. REFERENCIAS	82
XIV. ANEXOS	94
14.1 Promedios anuales de SO ₂ , O ₃ y NO _x (ppb).....	94
14.2 Promedios anuales de temperaturas y precipitación.....	95
14.3 Análisis multifactorial del crecimiento de los anillos	97

ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS

Página

FIGURAS

Figura 1. Oyameles del Parque Nacional Desierto de los Leones.	8
Figura 2. Sección transversal de oyamel	9
Figura 3. Emisiones anuales de SO ₂ , O ₃ y NO _x	17
Figura 4. Sección transversal de un tronco de conífera	20
Figura 5. Anillos de crecimiento de <i>Abies religiosa</i>	21
Figura 6. Aspecto microscópico tridimensional de la madera de coníferas	22
Figura 7. Traqueidas de madera temprana y tardía	23
Figura 8. Sección transversal de <i>Abies religiosa</i> donde se observan las traqueidas de madera temprana y tardía	23
Figura 9. Representación esquemática de secciones transversales de filas de células radiales del xilema en reposo y en desarrollo en <i>Pinus sylvestris</i> L.	25
Figura 10. Sección transversal de conífera donde se observan las partes de una traqueida	27
Figura 11. Parámetros que determinan madera temprana y tardía de acuerdo con Mork (1928)	27
Figura 12. Estructura de la celulosa	28
Figura 13. Pared de una traqueida con diversas capas	29
Figura 14. Ultraestructura de la pared celular	30
Figura 15. Ubicación del Parque Nacional Desierto de los Leones.....	35
Figura 16. Mapa del Parque Nacional Desierto de los Leones donde se muestra el paraje de muestreo: El Pantano	35
Figura 17. Paisaje de las condiciones del oyamel del del Parque Nacional Desierto de los Leones	37
Figura 18. Extracción de núcleos	39
Figura 19. Fijado de las muestras al bastidor.....	40
Figura 20. Pulido de los núcleos	40
Figura 21. Porción de núcleo pulido hasta evidenciarse las traqueidas.	41
Figura 22. Prefechado y sincronización (crossdating) de las muestras.....	41
Figura 23. Escaneo de las muestras	42
Figura 24. Medición de los anillos con WinDENDRO™	43
Figura 25. Diagrama del procedimiento para trabajar las muestras en WinCELL™	44
Figura 26. Cortes transversales	45
Figura 27. Cámara VE-LX1400 adaptada a microscopio óptico.....	45
Figura 28. Fotografía de corte transversal de <i>Abies religiosa</i> observado en microscopio óptico a 40x, en la que se aprecian las traqueidas.....	46

Figura 29. Cronología de los anillos de crecimiento 1960-2015.....	48
Figura 30. Prueba de rangos por etapas para crecimiento temprano y tardío	50
Figura 31. Emisiones de contaminantes vs crecimiento anual	53
Figura 32. Anomalías observadas en las virutas cuando se realizaba el prefchado de las cronologías	54
Figura 33. Ganancias anuales 1960-2015	55
Figura 34. Ilustración de las diferencias en la amplitud de los anillos medidos y la proporción ocupada por el crecimiento temprano y tardío	57
Figura 35. Gráfico de número de células vs crecimiento anual	59
Figura 36. Comparación de medias del número de células en relación al tiempo. 60	
Figura 37. Porcentaje de células por intervalo de medida de lumen promedio de todos los quinquenios (WinCELL™).....	62
Figura 38. Gráfico de lumen vs crecimiento anual	63
Figura 39. Gráfico de medias ANOM de las medidas de lumen por quinquenio ...	64
Figura 40. Gráfico de pared doble vs crecimiento anual	65
Figura 41. Gráfico de medias ANOM de las medidas de pared doble por quinquenio.....	66
Figura 42. Secciones transversales de oyamel donde se aprecia la diferencia en el ancho de la pared celular	67
Figura 43. Dendograma de crecimiento anual y parámetros traqueidales	70
Figura 44. Gráfico de crecimiento y precipitación pluvial anual.....	73
Figura 45. Gráfico de crecimiento y temperaturas máxima y mínima.....	74
Figura 46. Dendograma de crecimiento anual y parametros traqueidales con contaminantes y meteorológicos	75
Figura 49. Proceso del daño fisiológico por contaminantes	77

CUADROS

Cuadro 1. Literatura consultada como base teórica del proyecto.....	3
Cuadro 2. Media y desviación estándar por etapa	49
Cuadro 3. Periodos de aumento y disminución del crecimiento	51
Cuadro 4. Tasas de crecimiento por quinquenio	56
Cuadro 5. Número de células contadas por árbol (WinCELL™)	58
Cuadro 6. Porcentaje de células por intervalo de medida en casa quinquenio (WinCELL™)	61
Cuadro 7. Medias y desviación estándar de pared doble por etapa.....	67
Cuadro 8. Correlaciones de parámetros celulares vs crecimiento, contaminantes y meteorológicos	69

RESUMEN

El efecto de la contaminación atmosférica en el crecimiento de los arboles ha sido estudiado en varias partes del mundo, principalmente en Asia y Europa, sin embargo, los resultados siguen siendo controversiales porque no se ha determinado fehacientemente la inhibición del crecimiento. En México se han realizado pocos estudios en materia, por lo cual el objetivo del presente trabajo fue demostrar la relación entre los contaminantes atmosféricos: dióxido de azufre (SO₂), ozono (O₃) y óxidos de nitrógeno (NO_x) con la disminución del crecimiento de traqueidas y, por ende, de los anillos anuales de *Abies religiosa* en el Parque Nacional Desierto de los Leones, el cual se eligió debido a que por su ubicación, recibe los vientos que provienen de la zona urbana de la ciudad, y con ellos los contaminantes, además de tener una amplia gama de estudios que sustenta el decline forestal.

Para la medición de los anillos de crecimiento se utilizó el programa WinDENDRO™ (2003), y con WinCELL™ (2001) se realizó el conteo de traqueidas y medición de longitud del lumen. Mediante microtecnia convencional se hicieron las mediciones de longitud de lumen y de pared doble de traqueidas de madera temprana. Los datos se correlacionaron con el coeficiente de Pearson y para asociar las variables, el análisis de conglomerados.

Los resultados mostraron que la contaminación atmosférica reduce el crecimiento de los anillos y pared traqueidal. Los años con menor crecimiento (≤ 1.32 mm) se registraron entre 1985 y 2005; el SO₂, NO_x y O₃ tuvieron influencias estos disminuidos crecimientos, siendo el ultimo el más relacionado. En cuanto a los factores meteorológicos, la temperatura máxima presentó influencia en el decremento de los tamaños, mientras que el número de células y lumen presentaron asociación con la precipitación.

Se concluyó que la contaminación atmosférica reduce el crecimiento de paredes traqueidales y, por lo tanto, está causando una disminución en el ancho de los anillos anuales de *Abies religiosa* en el Parque Nacional Desierto de los Leones.

I. INTRODUCCIÓN

El fenómeno del “decline” forestal (decaimiento forestal) se presentó en los años sesenta y setenta en varios bosques de Europa, Canadá y EE. UU., la particularidad era que se encontraban cercanos a los complejos industriales metalúrgicos. A pesar de que la contaminación del aire está claramente involucrada en la disminución del crecimiento y la mortalidad en torno a las fuentes puntuales, los estudios aún no son suficientes para demostrar su efecto exacto, debido a que las relaciones causales son difíciles de demostrar a pesar de los enfoques sofisticados (Song *et al.*, 2009, Cook y Innes, 1989). Sin embargo, se ha aseverado que los daños en los bosques a nivel macroscópico son causados por alteraciones que se encuentran a nivel celular (Halbwachs, 1989).

El decaimiento forestal se ha estudiado a diferentes escalas: ecosistemas, comunidades, poblaciones, celular (fisiología y bioquímica); y en la literatura se han documentado diversos fenómenos como agentes causantes: el depósito ácido, enriquecimiento del aire con CO₂, efecto de invernadero, cambio climático, contaminación del aire, entre otros (Smith, 1981). Dichos estudios se realizaron principalmente en Europa, Asia, EE. UU. y Canadá, mientras que para México son muy escasos. Por ejemplo, Bauer (1972), Alvarado *et al.* (1993, 2002) y Bernal-Salazar *et al.* (2004), realizaron investigaciones para probar las causas del decline forestal sin llegar a una conclusión precisa.

Por más de cincuenta años los bosques del mundo han enfrentado el impacto de los fenómenos referidos, y el efecto más evidente es la disminución de la superficie forestal. En la Zona Metropolitana del Valle de México los bosques

montañosos han reducido su superficie, hasta el año 2000 la CORENA reportó la pérdida de 20 000 hectáreas.

El Parque Nacional Desierto de los Leones presenta diversos grados de deterioro de su vegetación a causa de la contaminación atmosférica, esto debido a su colindancia con la zona urbana (SEMARNAT, 2006), además de que la dirección de los vientos predominantes de la Ciudad de México es N-NE a S-SW, precisamente en dirección al parque (Jáuregui, 1988). Bernal-Salazar *et al.* (2004) reportaron reducciones en los anchos de anillos de crecimiento, los cuales atribuyeron a los contaminantes atmosféricos dióxido de azufre (SO₂), ozono (O₃) y óxidos de nitrógeno (NO_x) en el parque.

Por lo anterior, este trabajo comprobó que, la contaminación atmosférica está influyendo en el tamaño y producción celular de *Abies religiosa* del Parque Nacional Desierto de los Leones, trayendo consigo una reducción en los anillos de crecimiento de los árboles y, por ende, afectando la vitalidad de estos.

II. ANTECEDENTES

Los bosques de la Cuenca de México comenzaron a mostrar deterioro a partir de la década de 1970, uno de los más afectados es el Parque Nacional Desierto de los Leones (Terrazas y Bernal-Salazar, 2002). Alvarado *et al.* (1993) proponen que la contaminación del aire es la principal causa del decline de *Abies religiosa* en dicho bosque. Bauer (1972) reportó daños en tejido foliar y Bernal Salazar *et al.* (2004) reducciones en el crecimiento anual del tronco, a causa del ozono. Diversos estudios internacionales coinciden en que los contaminantes atmosféricos SO₂, O₃ y NO_x afectan los ecosistemas forestales y el crecimiento de los árboles, así mismo se ha dicho que la pared celular es la que tiene mayor influencia en el incremento del anillo anual. Autores como Flamand y Huerta (1964) y Huerta (1978) han reportado medidas de anillos y traqueidas de oyamel en condiciones saludables, las cuales serían anómalas en condiciones desfavorables para el crecimiento. Las aportaciones de estos y otros autores al presente estudio se describen en el cuadro 1.

Cuadro 1. Literatura consultada como base teórica del proyecto.

AUTOR	AÑO	CONTRIBUCIÓN
Flamand y Huerta	1964	Los anillos de crecimiento de oyamel son ≈ 2 por cm. El lumen de las traqueidas es de 12.5-68.0 μm y el grosor de la pared celular 3-7 μm .
Ashby y Fritts	1972	En años con niveles de contaminación atmosférica altos, el ancho promedio del anillo fue menor en los árboles cercanos a la fuente de contaminación.
Bauer	1972	Daño en acículas en arboles expuestos a ozono.
Huerta	1978	Los anillos de crecimiento de <i>Abies religiosa</i> : tienen un grosor de 3.35-6.10 mm en madera temprana y de 0.36-2.00 mm en madera tardía. Las traqueidas de primavera tienen una pared de 3 μm y lumen de 15-78 μm , las de

		verano tienen una pared de 3-7 μm y lumen de 10-58 μm .
Thompson	1981	Disminución general en el ancho del anillo con cantidades crecientes de contaminantes.
Eckstein <i>et al.</i>	1981	Alteraciones en el crecimiento se deben a la contaminación, basado en observaciones de formación de madera en <i>Pinus leucodermis</i> , se produjeron traqueidas grandes de madera temprana en años cuando se formaron anillos más grandes.
Mansfield y Freer-Smith	1984	Los estomas pueden abrirse o cerrarse como resultado de la penetración de contaminantes.
Gregory <i>et al.</i>	1986	Escasez de carbohidratos en especies de arbóreas dañadas por la contaminación.
Eckstein <i>et al.</i>	1989	La pared celular tiene gran influencia sobre el grosor de la madera.
De Kort	1990	Reducción en el crecimiento y longitud de las traqueidas se deben al estrés causado por contaminación.
Alvarado <i>et al.</i>	1993	El aire contaminado de la Ciudad de México puede ser la principal causa del decline en oyamel en el Parque Nacional Desierto de los Leones.
Segala	1995	La contaminación atmosférica es responsable de la modificación de la estructura de la madera de <i>Cecropia glazioui</i> .
Baucker <i>et al.</i>	1996	Escasa acumulación de pared celular en árboles de <i>Picea abies</i> dañados por la contaminación.
Yunus y Iqbal	1996	Los niveles críticos para la madera son 30 ppb para SO_2 , 50 ppb para O_3 y 30 ppb para NO_2 .
Álvarez <i>et al.</i>	1998	Clorosis y senescencia prematura de acículas en árboles <i>Abies religiosa</i> expuestos a contaminantes.
Terrazas y Bernal-Salazar	2002	El decline de los bosques en la Cuenca de México se ha observado desde fines de los años 70, uno de los más afectados es el Parque Nacional Desierto de los Leones.
Silkin y Kirdanov	2003	Las paredes de las traqueidas es un indicador de la acumulación de la masa del tronco.
Tolunay	2003	En las áreas con contaminación atmosférica intensiva se observan reducciones anuales en el ancho del anillo y pérdidas incrementales en los bosques.

Bernal-Salazar <i>et al.</i>	2004	Los cambios en el tamaño de ancho de anillos y traqueidas son causados por la contaminación del aire, especialmente ozono.
Karlsson <i>et al.</i>	2006	Concentraciones de ozono ≥ 40 ppb disminuyen la capacidad de los bosques para absorber CO ₂ .
Khan <i>et al.</i>	2007	Contaminantes del aire disminuyen la actividad fotosintética de las plantas leñosas.
Deslauriers <i>et al.</i>	2008	El tamaño de la célula contribuye al ancho del anillo más que el número de células.
Klisz	2009	WinCELL™ es un sistema de análisis de imágenes que permite medir el tamaño de las células.
Song	2009	La contaminación puede provocar la muerte de los árboles o reducir las tasas de crecimiento de estos.
Malik <i>et al.</i>	2012	Reducción del crecimiento radial de pinos por contaminación, especialmente dióxido de azufre.
Dudley y Stolton	2014	La contaminación del aire predispone a los árboles a otros agentes de estrés y los hace más susceptibles a enfermedades.
Xu <i>et al.</i>	2014	El ancho del anillo anual está relacionado con las medidas traqueidales.
Baciak <i>et al.</i>	2015	SO ₂ , NO _x y O ₃ afectan los ecosistemas forestales y el crecimiento de los árboles.

III. MARCO TEÓRICO

3.1 Bosque de oyamel

Abies religiosa (Kunth) Schlttdl. & Cham. fue clasificada en 1803 por Humboldt y Bonpland. El nombre reconocido como religiosa fue dado por Schlechtendahl y Chamisso en 1930. Esta denominación se debe a que las ramas eran empleadas como adorno en ceremonias religiosas y sacrales. En México la especie es conocida comúnmente con el nombre de “oyamel” (Manzanilla, 1974).

Es nativo de las montañas centrales y del sur de México (Eje Volcánico Transversal, Sierra Madre del Sur) y oeste de Guatemala. Crece a altitudes de 2,500 a 4,100 msnm en bosques frescos y con alta pluviosidad (gran cantidad de lluvia), de veranos húmedos y caída de nieve invernal (CONANP, 2019). La distribución natural de *Abies religiosa* en México abarca las zonas montañosas del sur de la Ciudad de México, y de los estados de Hidalgo, Puebla, Veracruz, Michoacán, Jalisco, Morelos, México, Guerrero y Tlaxcala, entre los 17° 30' y 21° 00' latitud Norte y entre los 97-104° 00' longitud Oeste (Martínez, 1963).

Es un árbol de alta montaña muy resistente al frío, pero no así a las altas temperaturas, en alturas inferiores a los 2,000 msnm presenta enfermedades y plagas que lo pueden matar. Prefiere sustratos bien drenados y húmedos la mayor parte del año. Las temperaturas en su hábitat varían entre los -20 °C, una media de 7° a 15° hasta máximas de 25°. La precipitación media anual es superior a los 1,000 mm. Los suelos donde se establece el oyamel son muy jóvenes, de origen volcánico (andesitas, basaltos o riolitas), y presentan geformas con pendientes

muy pronunciadas; aunque generalmente se establecen en suelos profundos (CONANP, 2019).

El oyamel es un árbol monoico, de hasta de 40 (60) m de alto y diámetro normal hasta de 1.80 m; tiene hojas perennifolias alternas, de 20 a 30 mm de largo por 1.5 mm de ancho, ápice agudo y córneo, base torcida, de color verde oscuro en el haz y glaucas en el envés; presenta inflorescencias masculinas oblongas, de 12 a 14 mm de largo por 5 mm de ancho, de color violáceo, al principio protegidas por mucha resina; inflorescencias femeninas en forma de conillos subcilíndricos, de 7 cm de largo, con las brácteas rojizas de margen rasgado; los conos maduros son cilíndrico-oblongos, de 10 a 16 cm de largo por 4 a 6 cm de ancho, casi sésiles; semillas resinosas de 9 a 10 mm de largo por 5 mm de ancho, lisas, de color castaño brillante, el ala mide 22 a 25 mm de largo por 10 a 15 mm de ancho (Calderón y Rzedowski, 2005; CONANP, 2019).

Las estructuras masculinas y femeninas del oyamel aparecen al mismo tiempo que las yemas vegetativas desde diciembre, los primeros continúan su desarrollo para alcanzar la madurez en los meses de marzo y abril, que es cuando se efectúa la polinización. Simultáneamente con la maduración de los conos, las yemas vegetativas continúan su desarrollo y alcanzan su máximo en los meses de agosto y septiembre. Al llegar a este punto, se comienzan a desprender las hojas viejas desde fines de junio, sobre todo las de ramillas de dos o más años anteriores. Las fases de reproducción y crecimiento vegetativo simultáneas son seguidas solamente por una fase vegetativa que se presenta tan luego como el oyamel empieza a diseminar la semilla (entre marzo y abril). El crecimiento y desarrollo de

estos nuevos brotes, es estimulado con el advenimiento de la temporada de lluvias, que es cuando alcanzan su máximo (Manzanilla, 1974).

Abies religiosa muy rara vez es atacado por enfermedades o insectos que sean causantes de la muerte de árboles aislados o de pequeños grupos. El muérdago y los descortezadores son su principal enemigo natural. La tala por parte del hombre y la falta de criterios para las reforestaciones, en relación con la obtención de semillas fértiles, son su principal amenaza (Manzanilla, 1974; CONANP, 2019).



Figura 1. Oyameles del Parque Nacional Desierto de los Leones.

La madera es de textura media, de color veteadado suave y sin olor ni sabor. La madera de la albura es amarilla con tinte café claro y se diferencia de la de color rojizo del duramen. Los anillos de crecimiento son concéntricos, de grosor variable, aproximadamente de 2 anillos por cm. La transición entre la madera clara de

primavera y la café claro de verano, es gradual (Manzanilla, 1974). La madera de verano tiene un grosor de 0.36-2.00 mm, y la madera de primavera de 3.35-6.10 mm. (Huerta, 1978). Para oyameles sanos, Flamand y Huerta (1964) reportan que el diámetro de las traqueidas es de 12.5-68.0 μm y el grosor de la pared celular 3-7 μm . Mientras que, Huerta (1978) reporta que las traqueidas de primavera tienen una pared de 3 μm y diámetro de 15-78 μm , y las de verano tienen una pared de 3-7 μm de grosor y diámetro de 10-58 μm (Figura 2).

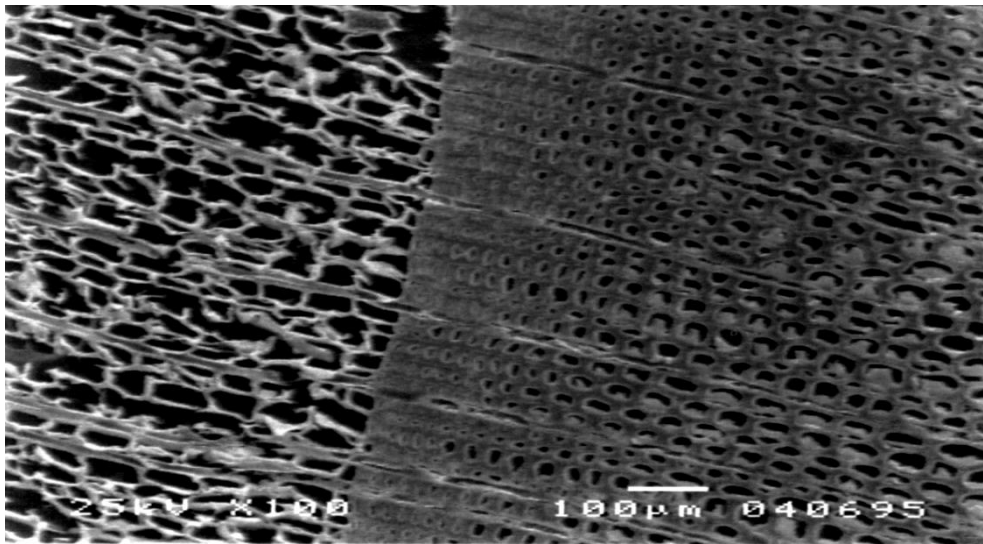


Figura 2. Sección transversal de oyamel (Laboratorio de Microscopia Electrónica del Instituto de Física-UNAM).

3.2 Efecto de la contaminación atmosférica a escala mundial

Baciak *et al.* (2015) refieren que la contaminación del aire es un problema importante a escala mundial, ya que, la presencia de gases fitotóxicos en el aire empeora las condiciones de crecimiento de los ecosistemas forestales. La acumulación de contaminantes ha dado lugar a una disminución generalizada y grave de los bosques en muchas partes de Europa y América del Norte (Song *et al.*, 2009).

Se han realizado estudios (Liu *et al.*, 2011; Bytnerowicz *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2011; Paoletti *et al.*, 2010) que indican que los contaminantes del aire con el mayor impacto en los ecosistemas forestales son dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO y NO₂) y ozono (O₃). Estos gases afectan los ecosistemas forestales y modifican el crecimiento de los árboles, cambiando la composición de las especies o aumentando la susceptibilidad de estos a factores bióticos. Los gases ácidos (SO₂ y NO_x) afectan indirectamente a los bosques al acidificar los suelos, lo que modifica los fluidos del suelo e influye en el acceso a los nutrientes. El azufre y los óxidos de nitrógeno (NO_x) están entre los principales contaminantes del aire, que se emiten a partir de fuentes antropogénicas. Las concentraciones de ozono (O₃) en la atmósfera varían, ya que se forma como resultado de las reacciones fotosintéticas de sus precursores (óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles y dióxido de carbono) (Baciak *et al.*, 2015).

De acuerdo con Maas (1987) y Rennenberg y Herschbach (1996), los contaminantes SO₂, HF y NO_x influyen en la fisiología de la planta por sí solos o en asociación con factores climáticos, por ejemplo, la sequía. El SO₂ afecta las hojas de los árboles y, por lo tanto, dificulta el proceso de asimilación (Khan *et al.*, 2007).

El dióxido de azufre (SO₂) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) ingresan a las plantas a través de sus estomas e influyen directamente los procesos fisiológicos de las hojas, principalmente la asimilación de CO₂ y la fotosíntesis, provocando la disminución la capacidad de esta (Baciak *et al.*, 2015; Pallardy, 2008). Los contaminantes atmosféricos pueden alterar la tasa de fotosíntesis por varios mecanismos: 1) obstrucción de los poros estomáticos; 2) alteración de las propiedades ópticas de las hojas mediante el cambio de la reflectancia y

disminuyendo la intensidad de la luz que llega al interior de la hoja; 3) alteración del balance térmico de las hojas; 4) inhibir el proceso fotosintético a través del desglose de la clorofila, así como la actividad de las enzimas fijadoras de carbono, la tasa de fosforilación y la capacidad de amortiguar el pH; 5) alterar la integridad de las membranas y ultraestructura de organelos y 6) inducir cambios en la anatomía foliar (Pallardy, 2008).

Thompson (1981) refiere que la disminución en la capacidad fotosintética de un árbol puede afectar la disponibilidad y el almacenamiento de alimentos, y la producción de reguladores del crecimiento, que pueden tener un efecto duradero en el crecimiento por períodos de hasta varios años. La tasa de transpiración disminuye y los procesos de asimilación carecen de minerales (Halbwachs, 1970).

El daño a los tejidos fotosintéticos puede influir en el crecimiento de otras partes del árbol, particularmente en los anillos anuales. Se han registrado disminuciones en el ancho anual del anillo en árboles expuestos a SO₂, NO_x y O₃. De Kort (1986), Kawakami y Furukawa (1992) y Wimmer *et al.* (1996) reportan que estas reducciones en el ancho del anillo se correlacionaron con cambios en el tamaño y número de células. También Nieweglowska-Guzik (1995), Segala (1995) y Schmitt *et al.* (2003) refirieron cambios a nivel estructural, por ejemplo, modificaciones en la forma de la traqueida y lignificación de la pared celular asociados a estos contaminantes (Thompson, 1981; Bernal-Salazar *et al.*, 2004). En Europa central, Kienast (1685) determinó que las coníferas (*Abies alba* Mill. y *Pinus sylvestris* L.) producían anillos estrechos en la región de la madera tardía por efecto del SO₂, NO_x y O₃. Así mismo, argumentó que la actividad del cámbium está determinada por la precipitación estival.

Los niveles críticos para anillos de madera (Yunus y Iqbal, 1996) son, para el SO₂ 30 mg/m³ (30 ppb), causando baja productividad del rodal, para O₃ 50mg/m³ (50 ppb) quien retarda la estación de crecimiento y para NO₂ 30 mg/ m³ (30 ppb).

3.2.1 Dióxido de azufre (SO₂)

El SO₂ pertenece al grupo de factores de estrés abióticos que causan disminución en el crecimiento de la biomasa (Noe *et al.*, 2011). En los ecosistemas forestales, el dióxido de azufre puede depositarse como materia seca o húmeda que afecta directamente al sistema de asimilación e indirectamente, a través de la acidificación del suelo (Baciak *et al.*, 2015).

La influencia directa del dióxido de azufre se produce por la penetración de partículas de gas a través de los estomas hacia el interior de la hoja. Después de penetrar las células de la hoja, se oxida a sulfitos, lo que da como resultado una disminución del pH de la hoja y la alteración del equilibrio de oxidación-reducción en el tejido vegetal. Eso causa la pérdida de clorofila, la interrupción del proceso de fotosíntesis a nivel enzimático, del transporte de electrones y, por último, menor asimilación de CO₂ (Jim y Chen, 2008; Sha *et al.*, 2010).

Malik *et al.* (2012) registraron reducciones en el tamaño de anillos en pinos que ocurrieron simultáneamente con altos niveles de emisión de dióxido de azufre. Otras investigaciones (Karolewski, 1992; Miś, 1995; Dincer *et al.*, 2003; Malik *et al.*, 2011) revelaron una reducción general del crecimiento del árbol observada mediante la disminución del diámetro y la altura del tallo, así como el daño morfológico de las acículas (Baciak *et al.*, 2015).

3.2.2 Ozono (O₃)

En el siglo XX, el dióxido de azufre jugó el papel más importante en la degradación de los bosques. Actualmente el ozono, en comparación con otros contaminantes atmosféricos, presenta la mayor amenaza para la producción de biomasa vegetal (Schaub *et al.*, 2005; Zapletal *et al.*, 2011). La alta concentración de ozono (más de 40 ppb) puede disminuir la capacidad de los bosques para absorber dióxido de carbono (Karlsson *et al.*, 2006).

El ozono daña rápidamente las células que se encuentran muy cerca de las aberturas estomáticas y luego afecta a los tejidos responsables de la fotosíntesis. Además de su influencia directa en el proceso de fotosíntesis, el ozono también causa alteraciones en el sistema vascular de la planta debido a los daños causados a los poros de los estomas, así como la obstaculización del cierre de estos, lo que provoca pérdidas excesivas de agua durante la transpiración, lo que resulta en la disminución del crecimiento de la biomasa y la resistencia de los árboles. La intensidad de las respuestas fitotóxicas de los árboles depende de la cantidad de ozono absorbido directamente a través de las aberturas estomáticas (Wagg *et al.*, 2012; Baciak *et al.*, 2015).

A nivel fisiológico, en los árboles dañados por el ozono disminuye el contenido de clorofila y permite una acumulación inusual de almidones, que suelen atraer insectos defoliadores, causando defoliación recurrente. Así mismo, acelera el envejecimiento de acículas. Otros efectos fisiológicos incluyen una mayor tasa de respiración, menor tasa de fotosíntesis, interrupciones en la asimilación de carbono y transporte de agua y nutrientes entre las raíces y las ramas. Reducir el flujo de

carbohidratos a la raíz, limita la alimentación de micorrizas, lo que a su vez merma la nutrición del árbol, causando una disminución general del crecimiento de la biomasa arbórea (Grant, 1996; Bytnerowicz, 2007; Malik *et al.*, 2011; Zapletal *et al.*, 2011).

Los árboles que crecen en las áreas con alta contaminación por ozono mostraron un menor incremento radial del tronco en comparación con los árboles que crecen en lugares menos contaminados (Weinstein *et al.*, 2005). La reacción del ozono con las estructuras celulares produce variantes de oxígeno reactivo (H_2O_2 , O_2^{\leftarrow} , HO^{\bullet} , $^1\text{O}_2^{\bullet}$), que provocan la desnaturalización de los lípidos de la membrana celular y su peroxidación (Baciak *et al.*, 2015). En el oeste de América del Norte, los altos niveles de ozono se han relacionado con la disminución prolongada del crecimiento en las coníferas (Muzika *et al.*, 2004).

3.2.3 Óxidos de nitrógeno (NOx)

La toxicidad de los óxidos de nitrógeno está relacionada con la ineficiencia de la vía reductora del nitrato (NO_3^-) (Baciak *et al.*, 2015). El ácido nítrico III (ácido nitroso) y el V, formados a partir del óxido nítrico absorbido como resultado de reacciones químicas y bioquímicas de las plantas (Hu y Sun, 2010), dañan las membranas biológicas y los cloroplastos y provocan la degradación de la clorofila. La influencia indirecta de los NOx incluye la acidificación del suelo y del agua con esos compuestos que, durante la absorción de nutrientes de la planta, se infiltran en el interior de la planta causando varios tipos de daños (Bobbink y Lamers, 2004).

Las condiciones favorables de la luz del sol provocan una apertura más amplia de los estomas foliares, lo que aumenta la penetración de óxidos de nitrógeno en el interior de la hoja. Este proceso se intensifica en condiciones de alta humedad (Bobbink y Lamers, 2004). Por un lado, su presencia puede aumentar la eficiencia fotosintética y, por lo tanto, impulsar el crecimiento de la biomasa forestal. La alta deposición de nitrógeno reduce la tasa de respiración, acelera la saturación de nitrógeno en áreas que ya tienen altas cantidades de este en el suelo, y disminuye su deposición en raíces pequeñas. Por lo anterior, puede ocurrir la lixiviación de nutrientes y la disminución de la producción neta de los ecosistemas forestales (Liu *et al.*, 2011; Wei *et al.*, 2012).

El aumento de la deposición de nitrógeno en los bosques tiene como resultado la acidificación y la eutrofización, lo que provoca cambios en la biodiversidad de los ecosistemas forestales (Simpson *et al.*, 2006). También puede conducir a una mayor susceptibilidad a las heladas de finales de primavera y principios de otoño (Matyssek *et al.*, 2012).

La presencia de óxidos de nitrógeno y compuestos nitrogenados del suelo está vinculada al proceso de secuestro de carbono, que es especialmente importante en el caso de los ecosistemas forestales. Investigaciones realizadas en bosques boreales y templados de Europa y América del Norte permitieron establecer un papel clave de la deposición de nitrógeno en la captura de carbono, que se expresa en una mayor producción primaria neta (Wei *et al.*, 2012).

3.3 Contaminación de la Ciudad de México

El llamado Valle de México es una cuenca plana, plana y nivelada, sin drenaje natural de agua de escorrentía. Ubicada en los trópicos (lat. 19 ° N), la cuenca de México (2 240 msnm) es una tierra plana amplia (100 km de N-S y 50 km E-W) rodeada de montañas con alturas medias de 600-800 m sobre el fondo del valle. La ciudad está ubicada en el extremo suroeste de la cuenca donde las cimas de las montañas son más altas, incluyendo los 5 000 m de volcanes nevados hacia el este. En el caso del área urbana de la Ciudad de México, el complejo terreno del valle de montaña junto con el sistema de viento inducido por la isla de calor tiende a mantener el aire contaminado cerca de la superficie dentro de los límites del área urbana, especialmente durante el período de la noche y la mañana por las inversiones de temperatura (Jáuregui, 1988).

La calidad del aire de la Ciudad de México y sus alrededores se ha ido deteriorando con el crecimiento poblacional y las actividades industriales. Los primeros indicios del problema se identificaron a principios de la década de 1960. A partir de entonces, se iniciaron los esfuerzos para solucionar este problema a través del monitoreo de la concentración de contaminantes, aunque fue hasta 1986 que el registro fue sistemático (figura 3). En el caso de los inventarios de emisiones, en 1988 se implementó el Sistema Nacional del Inventario de Emisiones de Fuentes Fijas, así como un proyecto para cuantificar las emisiones en el Valle de México (INECC, 2017).

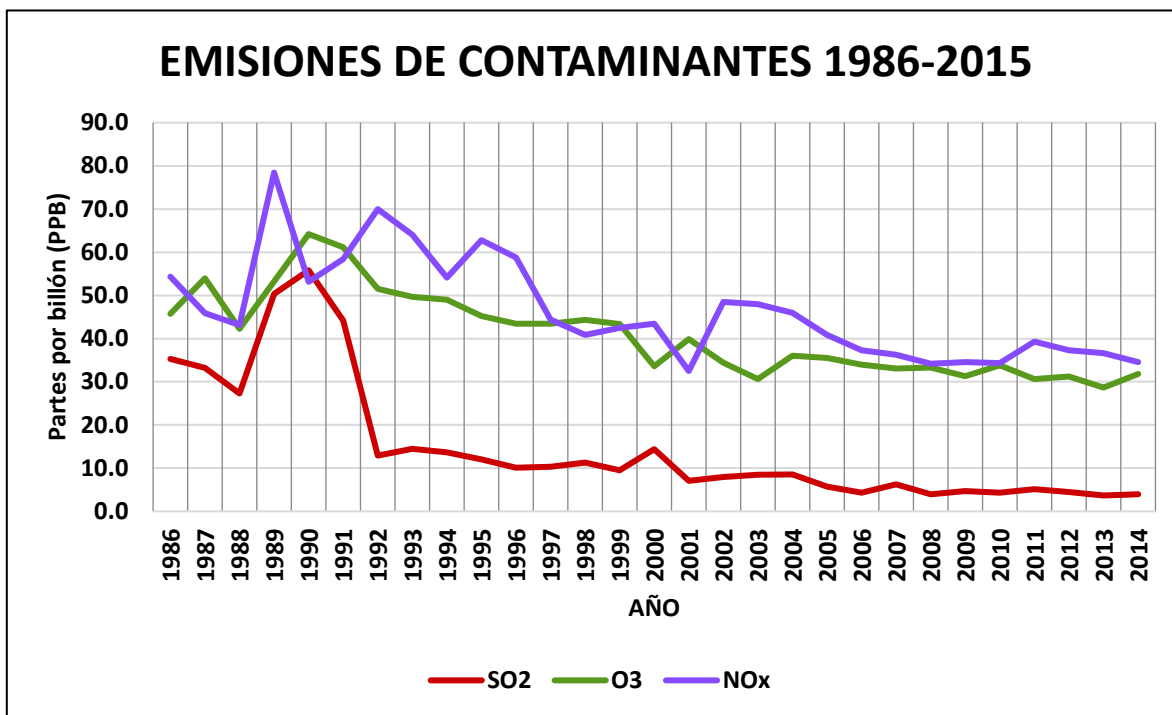


Figura 3. Emisiones anuales de SO₂, O₃ y NO_x de la estación Pedregal, 1986-2015 (Datos obtenidos de la RAMA, consultados en: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aKBh%27>, 2018).

En 1988, la emisión de contaminantes en el país llegó cerca de 40.5 millones de toneladas, de las cuales 58% correspondieron a fuentes naturales (el suelo, la vegetación y las actividades volcánicas) y 42% a la contaminación de origen humano. Los principales contaminantes relacionados con la calidad del aire son el bióxido de azufre (SO₂), el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO_x), las partículas suspendidas, compuestos orgánicos volátiles (COV) y el ozono (O₃) (INECC, 2007).

El impacto de ozono en la Ciudad de México aumentó desde septiembre de 1986, cuando Pemex introdujo una nueva gasolina para reducir los niveles altos de plomo en las partículas suspendidas del aire (Cibrián, 1989). Posteriormente el total de contaminantes emitidos en el Valle de México se redujo de manera importante entre 1994 y 1998, y desde entonces no ha habido cambios muy evidentes. Esta

reducción en la emisión de contaminantes se asocia a las mejoras en las fórmulas de las gasolinas y Diesel (INECC, 2017). El hecho de que la contaminación tenga un origen en las actividades del hombre implica que es un proceso extensivo, creciente y permanente (SEMARNAT, 2006).

La evidencia disponible indica que las concentraciones de gases oxidantes que se alcanzan diariamente en el área metropolitana de la ciudad de México son causantes de producir daños irreversibles a la vegetación presente en dicha área y en sus alrededores. El daño por gases oxidantes, en especial ozono, es más grave a medida que transcurre el tiempo. Entre los primeros estudios sobre la contaminación ambiental en la Ciudad de México figuran las investigaciones realizadas por Jáuregui en 1958, quien señaló que las montañas del sur del Valle de México impiden la salida lateral del aire contaminado que avanza sobre la ciudad generalmente de norte a sur. La evidencia disponible indica que el problema principal de la ciudad es el causado por los gases oxidantes producidos fotoquímicamente, debido a que el clima es tibio y seco. Los estudios del efecto de los contaminantes del aire sobre la vegetación en México, los inició Bauer a partir de 1971, quién detectó daños por gases oxidantes en algunas plantas indicadoras expuestas. Posteriormente, se observó que los pinos y otras plantas silvestres son afectadas por esos gases producidos por la ciudad de México y que son transportados por el viento (Hernández y Bauer, 1984).

El oyamel (*Abies religiosa*) es una de las especies más afectadas por los síntomas de la declinación forestal descrita en los bosques del sur del Valle de México desde mediados de la década de 1970, diversos estudios se han realizado al respecto (Ciesla y Macías, 1987; Paz, 1989; Alvarado-Rosales y Hernández-

Tejeda, 2002; Alvarado *et al.*, 1993; González-Medina *et al.*, 2010). El Parque Desierto de los Leones es el más antiguo, importante y estratégico de la Zona Metropolitana del Valle de México. Hay numerosos reportes del aumento de la contaminación desde mediados de 1980, época en que iniciaron los primeros estudios sobre la extensa mortalidad de las masas boscosas en el parque (Hernández y Benavides, 2018; González-Medina *et al.*, 2010), por lo cual, este sitio ha sido de gran interés para estudios relacionados al efecto de los contaminantes sobre la vegetación forestal, entre ellos los de Bauer en 1972, Alvarado *et al.* en 1993 y Bernal-Salazar *et al.* en 2004, quienes sugieren que daños en tejido foliar y en los tamaños del crecimiento anual del tronco, son producto de los contaminantes del aire.

3.4 Dendrocronología

La dendrocronología es la disciplina que estudia los anillos de crecimiento de los árboles, el tiempo de formación y su relación con las condiciones medioambientales pasadas de un sitio (figura 4). Así mismo, permite fechar la madera con los anillos anuales de crecimiento para conocer la edad de los rodales arbóreos y su historia biológica (Giraldo, 2010).

Un método para evaluar el efecto de los contaminantes en el crecimiento de los árboles es el estudio de los cambios anatómicos de los anillos de crecimiento (Bernal-Salazar *et al.*, 2004). La densidad de la madera del anillo de coníferas es el parámetro más importante para los estudios dendrocronológicos y depende

principalmente de las dimensiones de las traqueidas (Yasue *et al.*, 1996; Bernal-Salazar *et al.*, 2004).

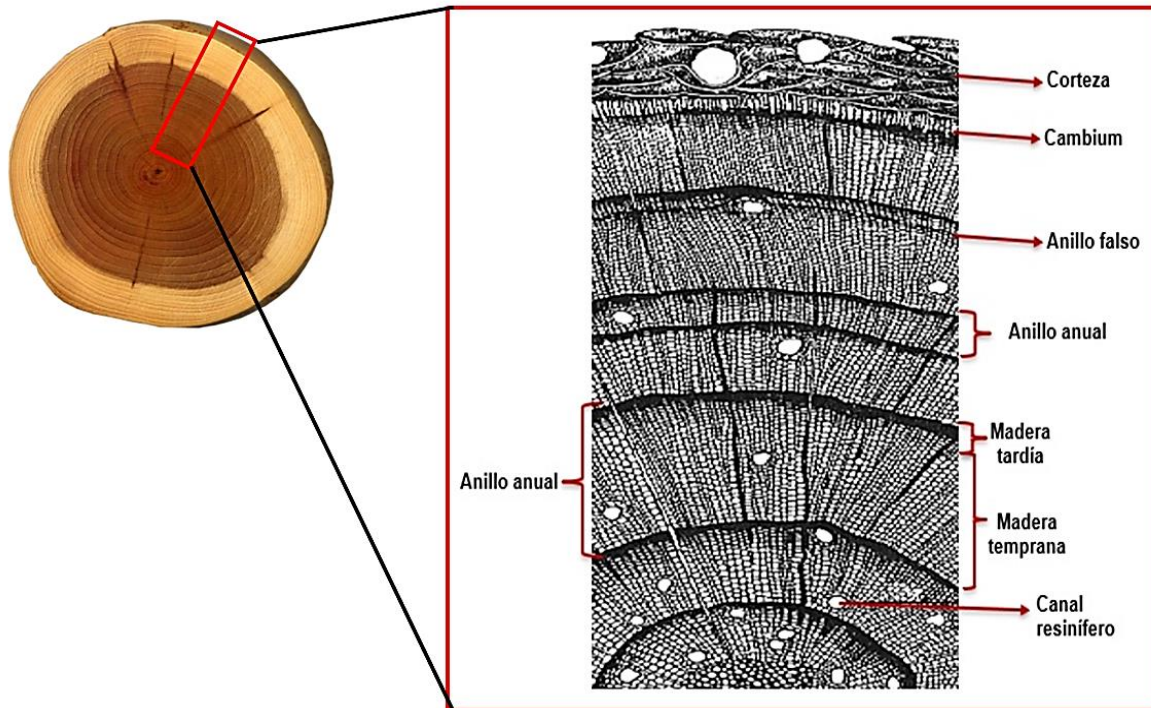


Figura 4. Sección transversal de un tronco de conífera (Tomada y modificada de Fritts, 1976).

3.5 Anillos de crecimiento

En las regiones templadas, los vegetales leñosos forman cada año una capa de madera bien definida y de forma concéntrica a las capas formadas en años anteriores, denominada anillo de crecimiento (figura 5) (Creus y Puigdefábregas, 1976).

La formación de anillos de árboles resulta partir de la producción celular; después de que una célula es originada por la división celular en el cámbium, crece en dirección radial y longitudinal, y finalmente, comienza la formación de la pared secundaria (Gindl *et al.*, 2000). El espesor de pared secundaria determina la

acumulación de biomasa en las paredes celulares, lo que incrementa la biomasa total de madera (Antonova y Stasova, 1993). El ancho del anillo es una medida de la suma de una división celular de la estación de crecimiento y la actividad de ampliación celular en la dirección del xilema (Gindl *et al.*, 2000). Depende principalmente de la tasa de división celular periclinal y de la fase de alargamiento celular en la región cambial (Wimmer y Grabner, 2000).

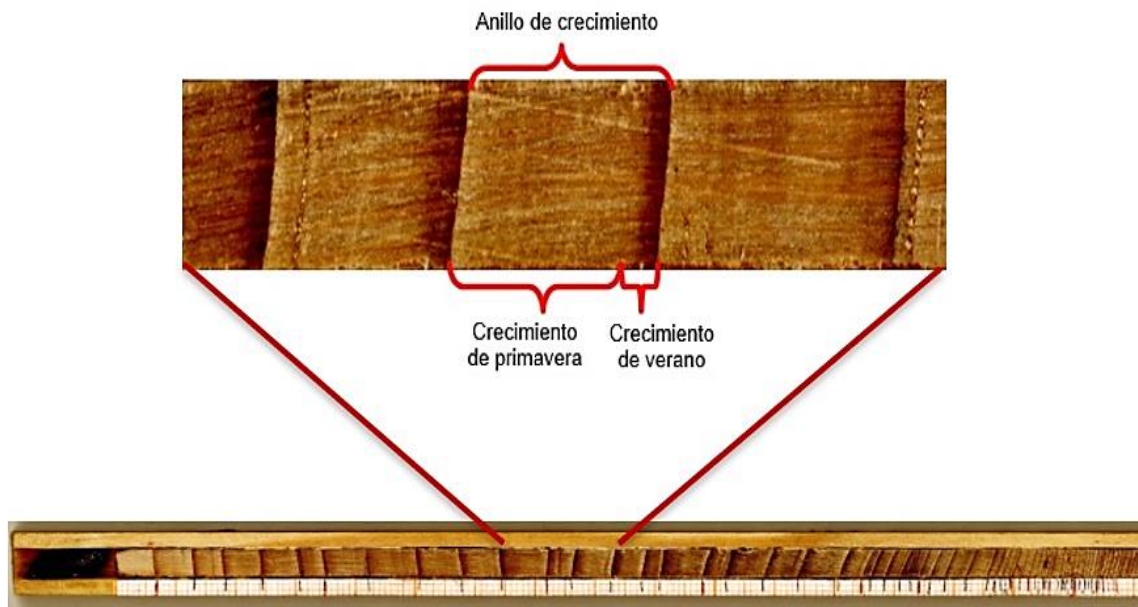


Figura 5. Anillos de crecimiento de *Abies religiosa*.

El anillo anual se divide en dos porciones conocidas como madera temprana (o de primavera) y madera tardía (o de verano). Las traqueidas de la madera temprana son las que se forman al inicio de la etapa de crecimiento, durante un periodo rápido de incremento radial. En la madera tardía, la actividad del cámbium decrece y las traqueidas presentan paredes gruesas con cavidades más chicas (Villanueva *et al.*, 2004).

Si bien los anillos de árboles son registros de la influencia de las condiciones ambientales, sus características anatómicas registran los cambios en la tasa de

crecimiento producidos por estas condiciones. Los anillos no solo integran los resultados del proceso de crecimiento, sino que también registran el proceso en sí. La estructura interna de un anillo de árbol contiene información sobre las condiciones ambientales en escalas de tiempo estacionales o incluso más finas (Vaganov *et al.*, 2006).

3.6 Elementos celulares

En la mayoría de los tallos de las gimnospermas, los elementos longitudinales del xilema se componen principalmente de traqueidas, y algunos pocos de parénquima axial y células epiteliales. Los elementos orientados horizontalmente, que son relativamente pocos, incluyen traqueidas radiales, células del radio del parénquima y las células epiteliales. También hay conductos de resina intercalados, orientados axial y horizontalmente, que son espacios intercelulares (figura 6) (Pallardy, 2008).

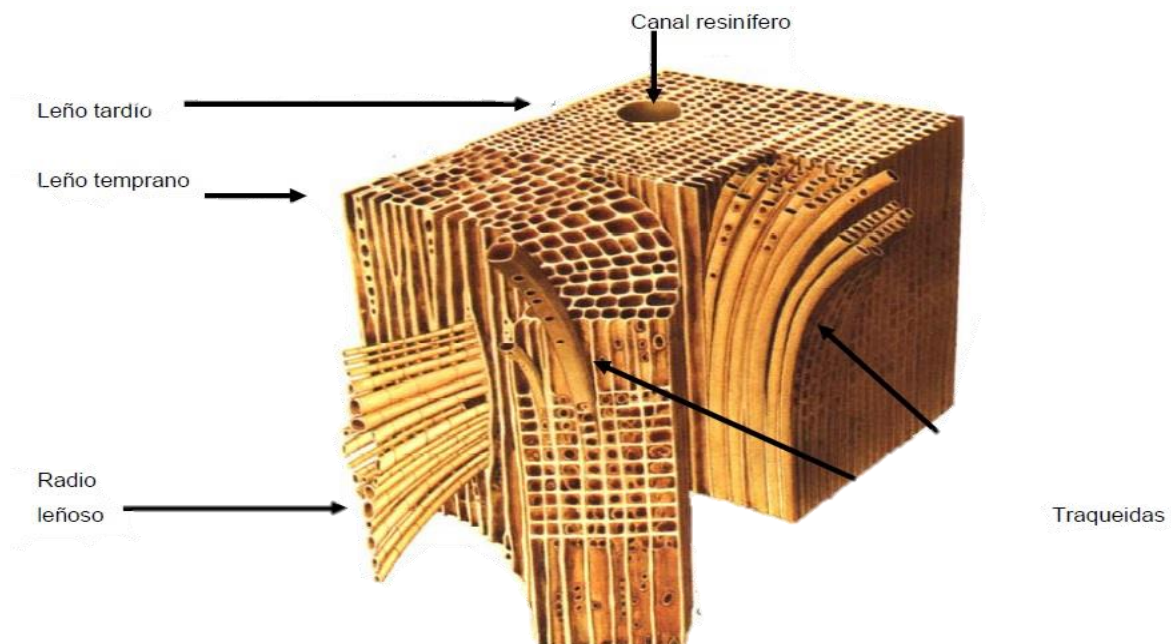


Figura 6. Aspecto microscópico tridimensional de la madera de coníferas (Tomada de Giménez *et al.*, 2005).

3.6.1 Traqueidas

El xilema de las gimnospermas se compone hasta en un 90% de traqueidas orientadas verticalmente, superpuestas, dispuestas en filas radiales uniformes. Estas células tienen de cuatro a seis lados, paredes gruesas y afiladas, y a menudo son hasta 100 veces más largas que anchas. Pueden variar en longitud de aproximadamente 3-7 mm, pero en la mayoría de las gimnospermas de zona templada tienen un promedio de 3-5 mm de longitud, 30 μm de diámetro (Pallardy, 2008) y paredes secundarias de 2-10 μm (Rathgeber *et al.*, 2016).

Las traqueidas a lo largo de la porción interna de un anillo son anchas y poseen paredes celulares delgadas. Estas células anchas forman la madera temprana (madera de primavera), de constitución porosa, con baja densidad y de tonalidad brillante. En alguna sección de la parte media del anillo, las traqueidas se tornan planas, con paredes gruesas y dan lugar a la madera tardía (madera de verano) (figuras 7 y 8). La transición entre madera temprana y tardía puede ser gradual en algunas especies y abrupta en otras (Villanueva *et al.*, 2004).

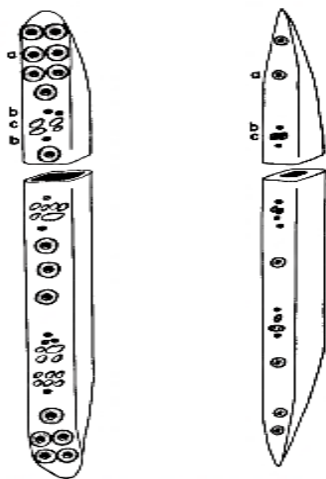


Figura 7. Traqueidas de madera temprana y tardía (Tomada de Pallardy, 2008).

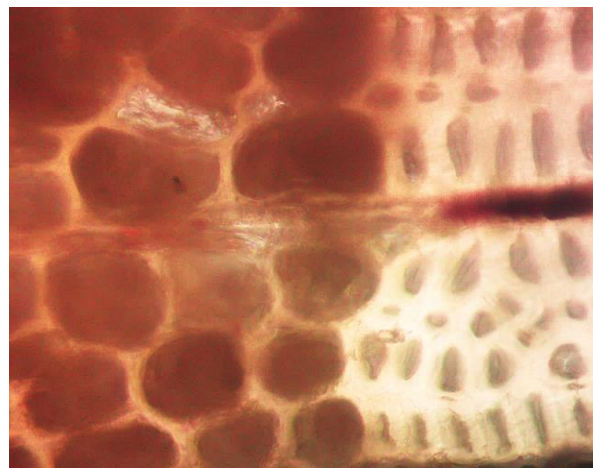


Figura 8. Sección transversal de *Abies religiosa* donde se observan las traqueidas de madera temprana y tardía.

3.6.2 Xilogénesis

La formación de células del xilema (xilogénesis) se divide en cinco fases: 1) la división de una célula madre cambial que crea una nueva célula; 2) la ampliación de esta célula recién formada; 3) la deposición de su pared secundaria; 4) la lignificación de su pared celular; y finalmente, 5) su muerte celular programada (Rathgeber *et al.*, 2016).

En la mayoría de las regiones del mundo, la actividad cambial sigue un ciclo estacional (figura 9). Al comienzo de la etapa de crecimiento, cuando la temperatura aumenta, el cámbium reanuda la actividad y produce nuevas células de xilema. Estas células están dispuestas a lo largo de filas radiales, y comienzan su programa de diferenciación de acuerdo con su fecha de nacimiento, creando filas típicas de xilema en formación. El ancho de estas tiras cambia a lo largo de la etapa de crecimiento. Finalmente, cuando las condiciones climáticas cambian (en particular, la temperatura o la disponibilidad de agua), la actividad cambial se detiene, luego sigue el agrandamiento de la célula y, posteriormente, la deposición de la pared secundaria (Rathgeber *et al.*, 2016).

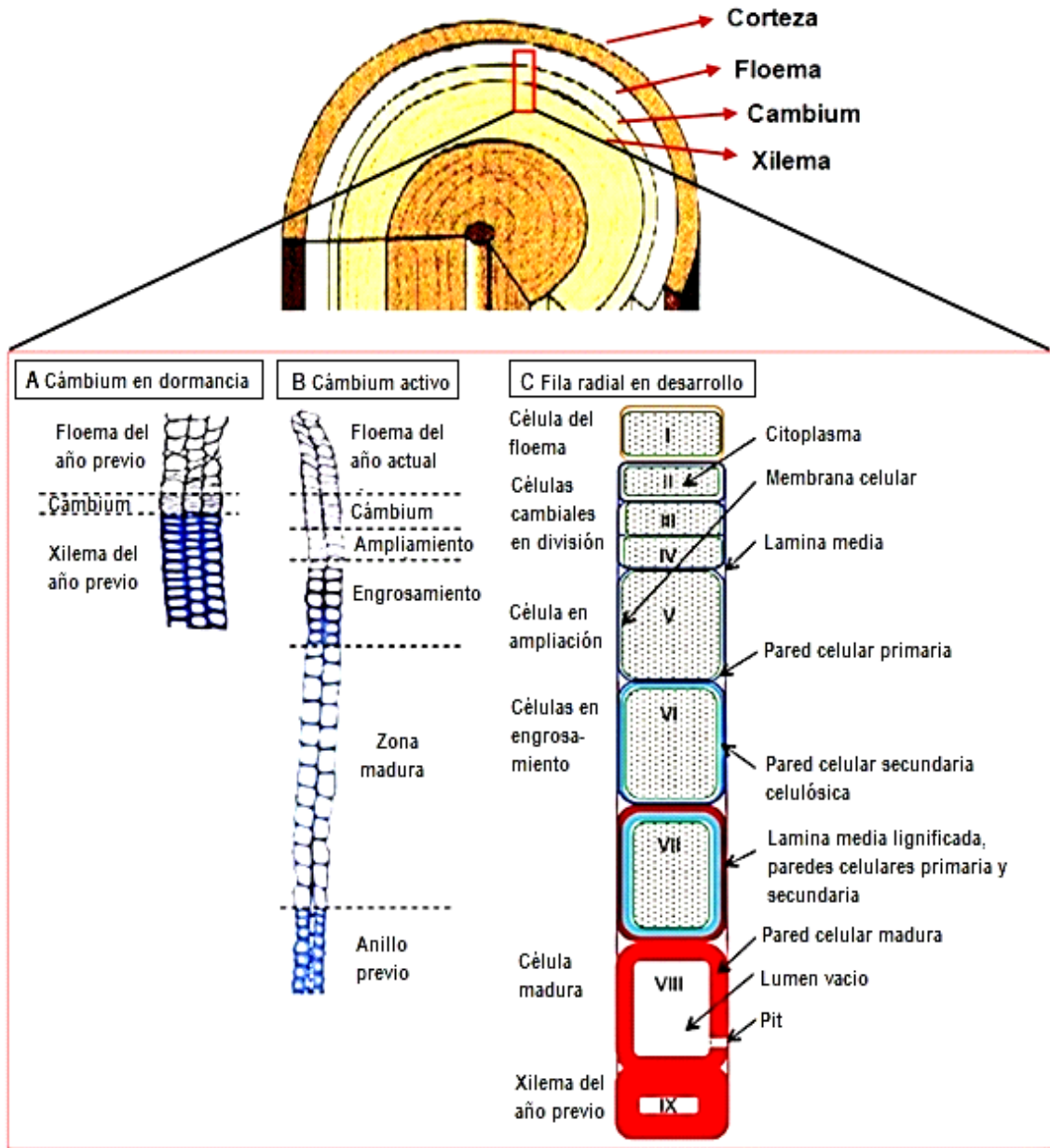


Figura 9. Representación esquemática de secciones transversales de filas de células radiales del xilema en reposo y en desarrollo en *Pinus sylvestris* L. (A) *Cambium* inactivo. (B) *Cambium* activo y filas celulares de desarrollo radial asociados al comienzo del verano. (C) Vista de una fila radial de xilema en desarrollo (Tomada y modificada de Rathgeber *et al.*, 2016).

La diferenciación traqueidal es una respuesta al transporte basipetal y acropetal de carbohidratos y hormonas de crecimiento, que se producen en acículas activamente crecientes, meristemas de la copa de árbol y sistema radicular. La disponibilidad de carbohidratos y reguladores del crecimiento de las plantas que se

producen dentro de la copa del árbol y el sistema radicular regulará la diferenciación traqueidal (Larson, 1994). En los árboles, hasta el 45% de los carbohidratos producidos por la fotosíntesis se asignan a la producción de madera (Creber y Chaloner, 1984).

Según Vaganov *et al.* (2006) los parámetros responsables de la producción de células y el ancho de los anillos de los árboles son: 1) el tamaño inactivo y de inicio de la zona cambial (el número de células), 2) la distribución específica de la tasa de crecimiento en la zona cambial, que es la misma que la distribución de la duración del ciclo celular, 3) tamaño promedio (máximo) de la zona cambial en el período de crecimiento principal.

3.6.3 Lumen

En muchos casos, en la madera, la célula es soportada únicamente por la pared celular. Esto significa que muchas células maduras de madera no requieren sus protoplastos y estos se degradan completamente antes de alcanzar la madurez funcional. Por esta razón, es común que en la literatura de madera se refieran a una pared celular sin un protoplasto como una célula (Rowell, 2005).

En el caso de una traqueida madura en la que no hay protoplasto, la porción abierta de la célula donde habría existido el protoplasto se conoce como lumen. Por lo tanto, en la mayoría de las células de la madera hay dos dominios: la pared celular y el lumen de la célula (figuras 10 y 11). El lumen es un componente crítico de muchas células, ya sea en el contexto de la cantidad de espacio disponible para la conducción de agua o en el contexto de una relación entre el ancho del lumen y el

grosor de la pared celular. El lumen es el espacio vacío en el interior de la célula (Rowell, 2005).

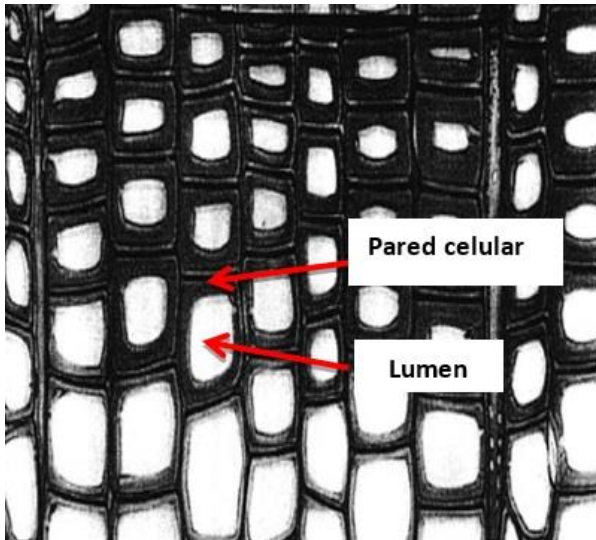


Figura 10. Sección transversal de conífera donde se observan las partes de una traqueida (Tomada y modificada de Vaganov *et al.*, 2006).

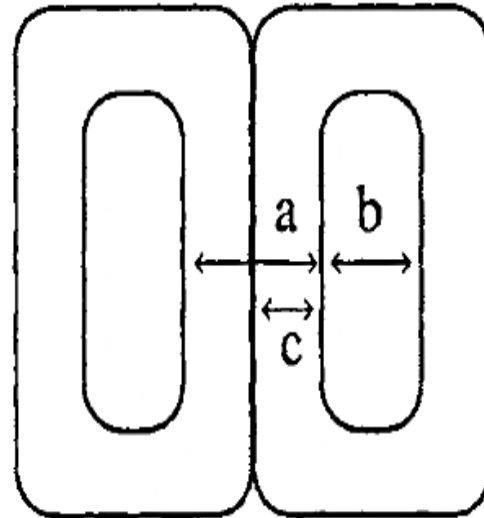


Figura 11. Parámetros que determinan madera temprana y tardía de acuerdo con Mork (1928) a) espesor de pared doble, b) lumen y c) espesor de pared única (Tomada de Denne, 1998).

3.6.4 Pared celular

Las paredes celulares tienen importantes funciones en la absorción, transporte y secreción de sustancias en las plantas, y también sirven como lugares para la actividad lisosómica o digestiva. La pared celular limita el tamaño del protoplasto y lo protege de una posible rotura debida al aumento de volumen provocado por la entrada de agua hacia la vacuola. El componente principal de la pared celular vegetal es la celulosa (figura 12), la cual determina su arquitectura. La celulosa está conformada por moléculas de glucosa enlazadas entre sí. Las moléculas de celulosa están unidas en microfibrillas de 10 a 25 nanómetros de diámetro. La celulosa tiene propiedades cristalinas debido al ordenamiento particular de las

moléculas en ciertas partes de las microfibrillas. Otro constituyente de las paredes de muchos tipos de célula es la lignina, junto con la celulosa, es el polímero más abundante en los vegetales, y sirve para dar rigidez a la pared (Raven *et al.*, 1991).

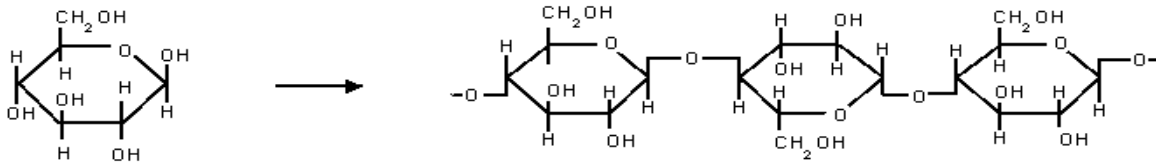


Figura 12. Estructura de la celulosa (Tomada de Pallardy, 2008).

Las paredes celulares crecen en grosor y en superficie. El crecimiento de la pared es un proceso complejo bajo un estrecho control bioquímico del protoplasto. Ello requiere una relajación de la estructura de las paredes (fenómeno vinculado a la hormona auxina) y un aumento de la síntesis proteica, de la respiración y de la toma de agua por parte de la célula. La mayoría de las nuevas microfibrillas se disponen encima de las formadas previamente, aunque algunas pueden insertarse entre la estructura existente de la pared (Raven *et al.*, 1991).

La pared celular consta de tres regiones principales: la laminilla media, la pared primaria y la pared secundaria (figura 13). Cada región, tiene tres componentes principales: microfibrillas de celulosa (con distribuciones y organización características), hemicelulosas y una matriz o material incrustante, típicamente pectina en paredes primarias y lignina en paredes secundarias (Rowell, 2005). La lámina media es la primera membrana de separación entre un par de células nuevas en el proceso de división celular, está constituida principalmente por pectato de calcio y magnesio, cuya función es ligar una célula con otra. A partir de

esta membrana se depositan en el interior de la célula microfibrillas de celulosa, formando una trama desorganizada que constituye la pared primaria.

M= lámina media
P = pared primaria
S₁, S₂, S₃ =capas de pared secundaria
W = capa verrugosa

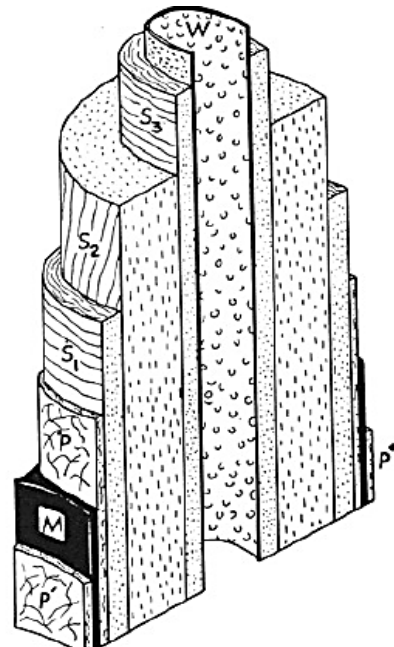


Figura 13. Pared de una traqueida con diversas capas (Tomada de Giménez *et al.*, 2005).

De manera paralela al depósito de pared secundaria se inicia, de afuera hacia adentro, el proceso de lignificación que es mucho más intenso en la lámina media y en la pared primaria (las células meristemáticas y la mayoría de las parenquimáticas no están lignificadas). Revistiendo el lumen se observa, en muchas células, una capa verrugosa que son restos de protoplasma (Giménez *et al.*, 2005).

De acuerdo con el mismo autor, los elementos estructurales fundamentales de la pared celular son las microfibrillas, las cuales están inmersas en una sustancia básica llamada matriz, que está compuesta principalmente por pectinas, hemicelulosas, y celulosa. Las microfibrillas están formadas por grupos de fibrillas que encierran aproximadamente 36 cadenas de celulosa. Fajas de microfibrillas (más o menos 20) forman las macrofibrillas (miofibrillas) y éstas finalmente forman

las láminas de pared celular (Figura 14). En la pared primaria, las microfibrillas tienen un arreglo irregular. En la capa externa (S1) de la pared secundaria, las microfibrillas están orientadas casi perpendiculares al eje largo de la célula.

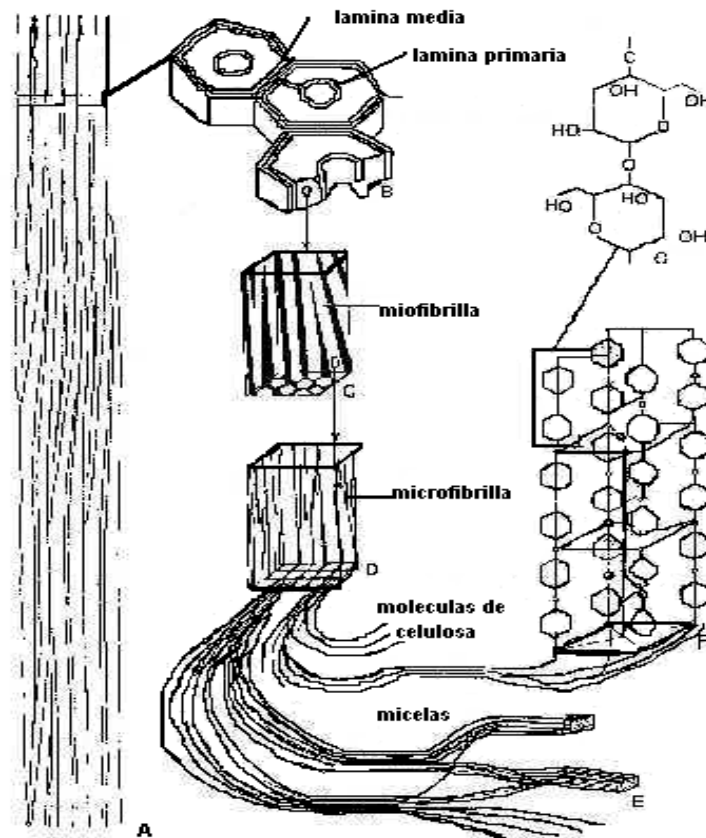


Figura 14. Ultraestructura de la pared celular (Giménez *et al.*, 2005).

En la capa S2, las microfibrillas corren casi paralelas entre sí en una espiral cerrada alrededor de la célula. Esta capa es la más gruesa y tiene el mayor efecto sobre cómo se comporta la célula y, por lo tanto, la madera (Giménez *et al.*, 2005). La masa de las paredes de las traqueidas es un indicador directo de la acumulación de masa del tronco y depende de la tasa de fotosíntesis durante el período de formación y desarrollo de traqueidas (Silkin y Kirdeyanov, 2003).

IV. PROBLEMA

El efecto más notable atribuido a la contaminación del aire en la Ciudad de México es la severa pérdida en cobertura del bosque de *Abies religiosa* en el Parque Nacional Desierto de los Leones, ya que recibe los vientos que provienen de la zona urbana de la ciudad (Fenn *et al.*, 2002).

El dióxido de azufre (SO₂), ozono (O₃) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) disminuyen la actividad fotosintética de las plantas leñosas, afectan su fisiología inhibiendo el crecimiento y causando lesiones visibles hasta la muerte (Khan *et al.*, 2007). Una reducción drástica en el ancho del anillo se produjo en los árboles en declinados a partir de los años setenta (Alvarado *et al.*, 1993). Así mismo, Bernal-Salazar *et al.* (2004) propusieron que la contaminación atmosférica reduce el ancho del anillo y el tamaño de las traqueidas de *Abies religiosa* en el Parque Nacional.

Partiendo del supuesto anterior, se plantearon las siguientes preguntas: Si se ha determinado que concentraciones mayores a 30 partes por billón (ppb) de SO₂, O₃ y NO_x son fitotóxicas para la vegetación arbórea y las emisiones de la Ciudad de México han rebasado esos niveles, ¿El efecto de los contaminantes se verá reflejado como una reducción el crecimiento de los anillos y traqueidas?, ¿La exposición de los árboles a esas concentraciones fitotóxicas es un factor influyente en el declive del bosque?

V. JUSTIFICACIÓN

En México los estudios referentes a la muerte masiva de oyamel y a los daños por contaminantes atmosféricos en vegetación arbórea son escasos, y los resultados obtenidos por los autores tienen discrepancias entre el origen de su decaimiento: estrés hídrico o nutrimental, cambios en los patrones de clima, el efecto individual por los contaminantes del aire (ozono, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno) o el efecto conjunto. Sin embargo, al expresarse los daños en el arbolado y las grandes pérdidas de diversos bosques de la Zona Metropolitana del Valle de México, es importante realizar estudios que contribuyan a revelar lo que genera este decline.

VI. HIPÓTESIS

Si las traqueidas se reducen en número y tamaño durante sus etapas de crecimiento por el efecto del SO_2 , O_3 y NO_x , entonces, las dimensiones de estas células y de los anillos anuales, serán menores en los años de mayores emisiones de estos contaminantes.

VII. OBJETIVOS

7.1 General

Determinar la disminución del crecimiento de los anillos y traqueidas de *Abies religiosa* a causa de los contaminantes SO₂, O₃ y NO_x, atribuyéndose como un factor del decaimiento forestal.

7.2 Particulares

1. Medir los anillos de crecimiento (WinDENDRO™, 2003) restringiendo el error experimental y evitar un sesgo en su interpretación biológica; y complementarla con el conteo de traqueidas y la medición lumen (WinCELL™, 2001) y pared.
2. Comparar las medidas obtenidas de traqueidas y anillos anuales del oyamel con las referidas (Flamand y Huerta, 1964; Huerta, 1988) antes del periodo crítico de la contaminación del aire de la Ciudad de México.
3. Demostrar que el tamaño del anillo de crecimiento es el reflejo de los tamaños traqueidales, y a su vez del decaimiento forestal.
4. Relacionar estadísticamente el crecimiento anual (anillos y traqueidas) con las concentraciones de SO₂, O₃ y NO_x y con los registros de precipitación pluvial y temperaturas.

VIII. ÁREA DE ESTUDIO

El Desierto de los Leones es uno de los bosques más grandes e importantes de la Ciudad de México, y se encuentra expuesto a la trayectoria de los vientos cargados de contaminantes provenientes de las zonas industriales, lo que lo ha convertido en uno de los bosques más estudiados en materia de contaminación atmosférica. Según refiere CONANP-SEMARNAT (2006) la mayor parte de su vegetación presenta diversos grados de deterioro; esto se debe a la acción directa de la contaminación del aire proveniente de la zona urbana (declinación), a los incendios forestales y a un manejo forestal inadecuado.

Abies religiosa se eligió para este estudio por ser una de las especies en las que se ha registrado mayores daños, los cuales se han atribuido a la exposición a los contaminantes del aire, además esta especie presenta los ejemplares longevos en el sitio de estudio.

8.1 Localización

El área de estudio fue el Parque Nacional Desierto de los Leones, el cual se localiza en la región central de la república mexicana, al suroeste de la Cuenca de México (figura 15) y pertenece a la unidad geomorfológica Sierra de Las Cruces, que forma parte del Eje Neovolcánico Transversal. Se encuentra dentro de las coordenadas geográficas: latitud norte 19° 15' 20" y 19° 19' 40" y longitud oeste 99° 17' 40" y 99° 19' 40". Cuenta con una superficie de 1 866 hectáreas (González y Sánchez, 1961; Vargas, 1997). El paraje de muestreo fue "El Pantano" (figura 16).

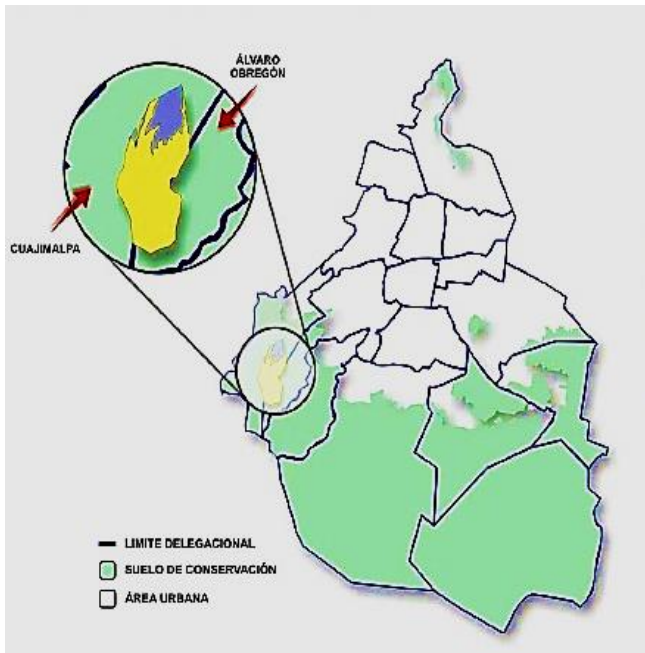


Figura 15. Ubicación del Parque Nacional Desierto de los Leones (Tomada de <https://es.slideshare.net/franagui/desierto-de-los-leones>).

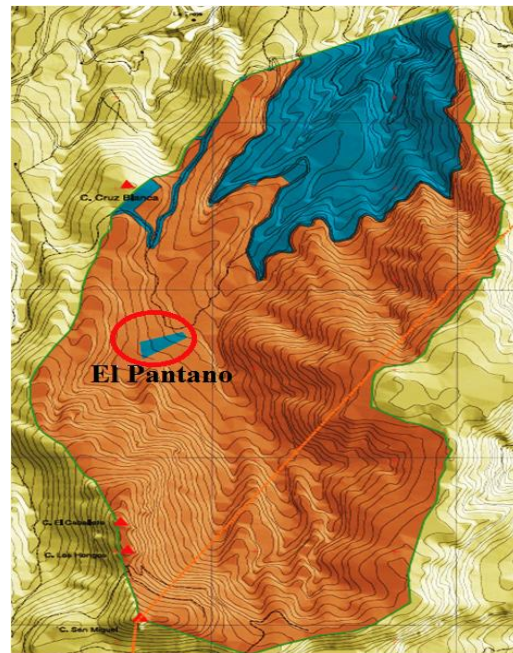


Figura 16. Mapa del Parque Nacional Desierto de los Leones, donde se muestra el paraje de muestreo: El Pantano (Tomada de CONANP-SEMARNAT, 2006).

8.2 Clima

Se presentan dos tipos de clima: en la mayor parte del parque, norte y centro, se presenta el clima semifrío subhúmedo C(E)x, con lluvias en verano. Y en la porción sur, el clima semifrío húmedo C(E)x con abundantes lluvias en verano. Pasan dos isotermas, una en la porción norte de 10° C y otra en la porción centro-sur de 8° C. Pasa una isoterma en la porción sur del parque de 1 500 mm. Se establecen ocho ambientes climáticos que van desde el fresco subhúmedo hasta el muy frío subhúmedo. El carácter benigno de estos ambientes decrece progresivamente de norte a sur conforme el relieve adquiere potencia y elevación, y los vientos dominantes fluyen por los valles desplazando masas de aire (Vargas, 1997).

8.3 Edafología

De acuerdo con INEGI (2000) los suelos del Parque son de origen volcánico, dominan las andesitas; son profundos, de hasta dos metros de espesor, con abundante detritus orgánico; subsuelo rocoso e impermeable, bien drenados y fértiles; húmedos la mayor parte del año. Los valores de pH son, por lo general, ligeramente ácidos. En la totalidad del Parque Nacional el tipo de suelo se clasifica como podzólico y corresponde al tipo café vegetal con textura arcillo-arenosa y arcillo-silicona (SEMARNAT, 2006).

8.4 Vegetación

De acuerdo con Vargas (1997) en el parque se presentan diferencias altitudinales de más de 1 000 metros, que permiten el desarrollo de distintas comunidades vegetales. Predomina el bosque de coníferas representado por comunidades de *Abies religiosa* puras o mezcladas y de *Pinus hartwegii*. La comunidad de *Abies religiosa* se establece desde los 2 600 metros de altitud y se caracteriza por tener suelos profundos y húmedos. En los estratos medio y bajo están bien representadas las especies *Garrya laurifolia*, *Alnus firmifolia*, *Salix* spp., *Roldana angulifolia* y *Roldana barba-johans* en el primero. En el segundo, principalmente: *Acaena alongata*, *Siegesbeckia jorullensis*, *Alchemilla procumbens*, *Salvia* spp. y *Symphoricarpos microphyllus*. La comunidad de *Pinus hartwegii* se establece a partir de los 3 600 m.s.n.m. en suelos menos húmedos y pedregosos caracterizados por exhibir masas arbóreas prácticamente puras de esta especie y también un estrato bajo muy bien representado por *Muhlenbergia* spp., *Festuca* spp.,

Calamagrostis tolucensis, *Lupinus* spp. y *Penstemon gentianoides*, frecuentemente se observan arbustos como *Senecio cinerarioides* y *S. salignus*. En las partes altas, entre los 3 700 metros y el techo altitudinal son distinguibles pequeños manchones de pastizal, dominados por *Muhlenbergia macorura* y *Festuca tolucensis*, hacia la parte Sur del parque son distinguibles porciones pequeñas de *Quercus* spp. (Figura17).



Figura 17. Paisaje de las condiciones del oyamel del Parque Nacional Desierto de los Leones.

IX. MÉTODO

9.1 Trabajo de campo

Se eligió un rodal homogéneo fisiográficamente dentro del paraje El Pantano (19°18'05" N y 99°19'20" O, 2937 m.s.n.m.) en el Parque Nacional Desierto de los Leones. Posteriormente, se seleccionaron 10 árboles por el método del vecino más cercano con las condiciones ecológicas y edáficas recomendadas por Cook y Kairiukstis (1990), principalmente árboles maduros, sanos y con cobertura de copa por arriba de 75%.

Siguiendo las indicaciones de Grissino-Mayer (2003) con un taladro Pressler se extrajeron dos núcleos por cada árbol a la altura del pecho (1.30 m) y en dirección perpendicular a la pendiente (Cook y Kairiukstis, 1990). De acuerdo con lo recomendado por Fritts (1976) los orificios que quedaron de la extracción se sellaron con taquetes de madera previamente reposados en formol-alcohol, para evitar el ataque de agentes patógenos (figura 18). Para la conservación y transporte de las muestras al laboratorio se guardaron en popotes.



Figura 18. Extracción de núcleos. A) Perforación; B) Extracción de la viruta; C, D) Sellado del orificio.

9.2 Trabajo de laboratorio

9.2.1 Tratamiento de las muestras

Se eliminó la humedad de las muestras en una estufa de secado a una temperatura de 45°C por 72 horas. Una vez secas, se montaron y prepararon siguiendo las técnicas dendrocronológicas estándar descritas por Stokes y Smiley (1996).

Las muestras se orientaron axialmente respecto al tronco y se fijaron a un bastidor con pegamento blanco líquido (figura 19), posteriormente se envolvieron firmemente con una cuerda esperando un tiempo de secado de 24 horas para proceder al pulido (figura 20).

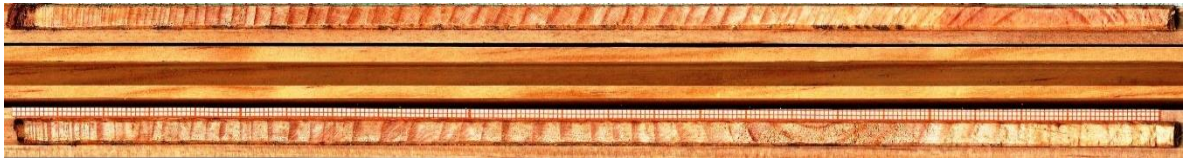


Figura 19. Fijado de las muestras al bastidor.

Para el pulido se utilizaron lijas secuenciales en granos de 50, 80, 120 y 400 para evidenciar los anillos hasta el nivel de las traqueidas (figura 21).

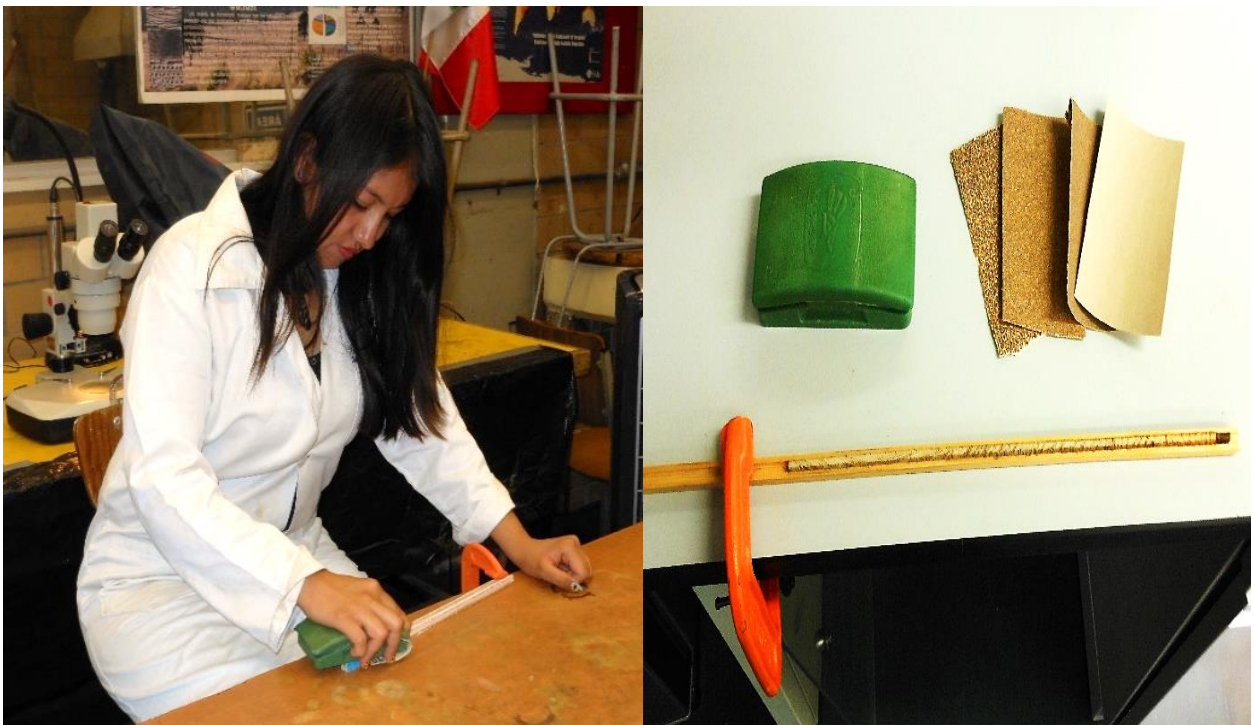


Figura 20. Pulido de los núcleos.

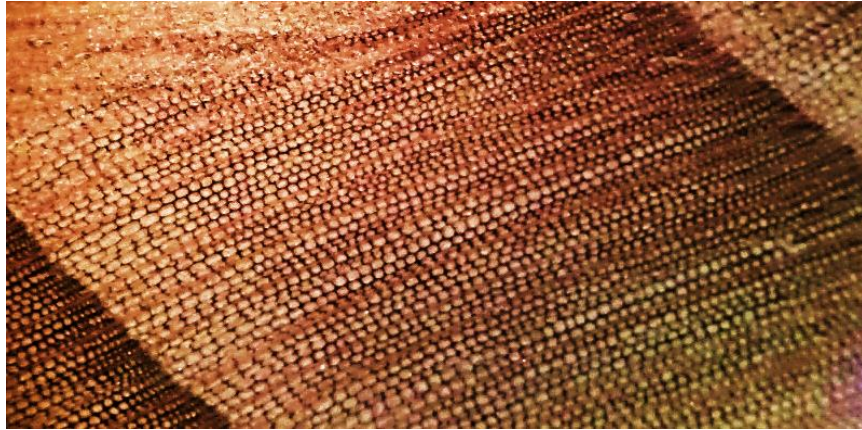


Figura 21. Porción de núcleo pulido hasta evidenciarse las traqueidas.

De acuerdo con lo descrito por Gutiérrez (2003) se prosiguió a realizar el prefchado de las muestras con ayuda del estereoscopio y posteriormente se sincronizaron (crossdating) (figura 22) para evitar contar anillos dobles u omitir anillos ausentes.

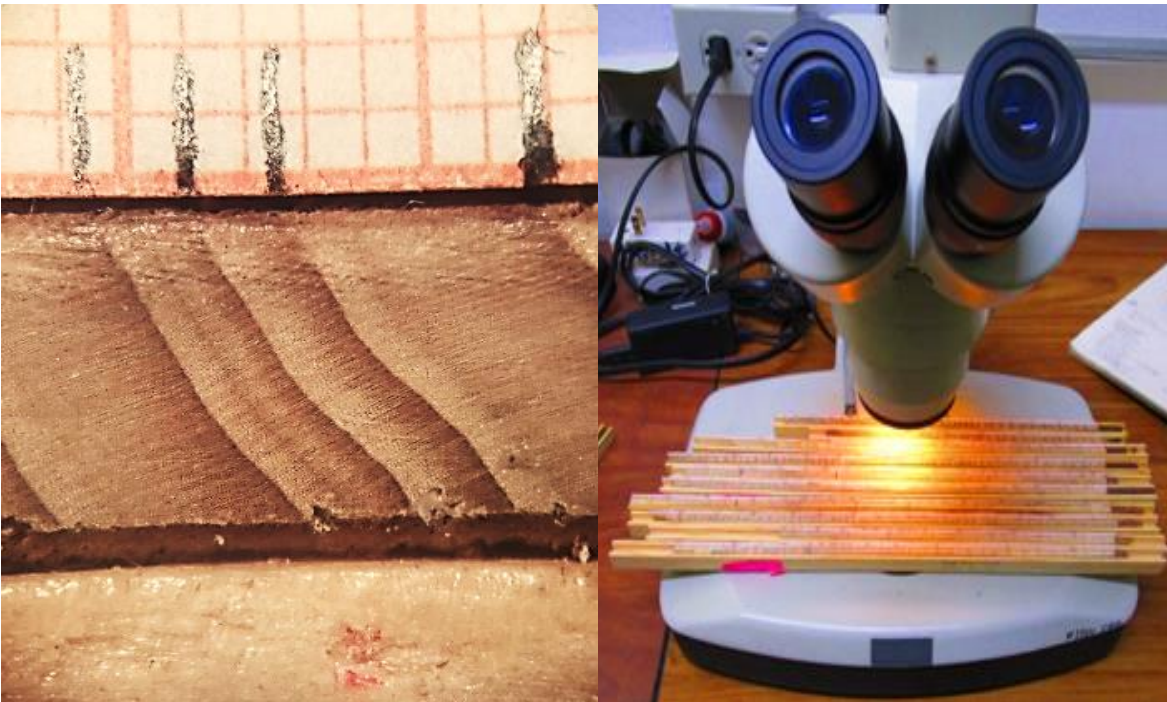


Figura 22. Prefchado y sincronización (crossdating) de las muestras.

9.2.2 Análisis de las muestras

Las virutas se escanearon con el escáner Epson Expression 1680 (figura 23) para posteriormente poder trabajarlas con los programas WinDENDRO™ (2003) y WinCELL™ (2001). Los anillos se midieron individualmente (por año) y las traqueidas en conjunto de cinco años (quinquenio).



Figura 23. Escaneo de las muestras.

Con WinDENDRO™ (2003) se obtuvieron las mediciones de las virutas para ancho total de anillo, madera temprana y tardía, con la finalidad de corroborar sus variaciones anuales de los años 1960 a 2015 (figura 24).



Figura 24. Medición de anillos con WinDENDRO™.

WinCELL™ (2001) se utilizó para conteo de traqueidas¹ y la medición del lumen por quinquenio de 1960 a 2015. Para ello, primero las virutas escaneadas se dividieron por quinquenios. Este programa realiza las mediciones de las células en un intervalo asignado, el cual se divide a su vez en diez intervalos menores y proporciona el número de células que se encuentran en cada uno de ellos, por ello, se le asignó el intervalo de la distribución de la medida del lumen reportado por Flamand y Huerta (1964) que es de 12.5-68 μm , ya que ellos estudiaron arboles sanos y en condiciones óptimas para su crecimiento (figura 25). Posteriormente los datos obtenidos se unificaron transformándolos en porcentaje, para conocer el % de células totales del quinquenio que se encuentran en cada medida (intervalo).

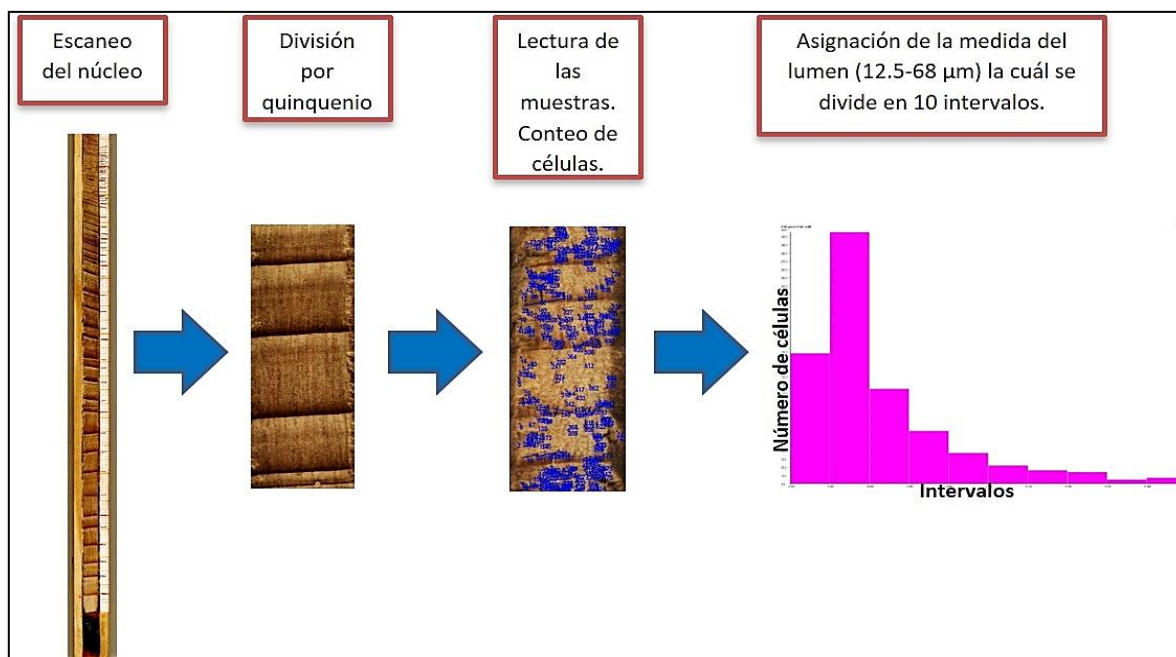


Figura 25. Diagrama del procedimiento para trabajar las muestras en WinCELL™.

¹ El programa WinCELL™ hace la medición directamente de la muestra de madera, el número de células que proporciona es en relación con las que el programa detecta, no al número exacto que tiene el quinquenio.

Se seccionaron con una navaja las virutas por quinquenio (figura 26). A continuación, se eligieron 5 muestras de cada quinquenio, y con la cámara digital para microscopio óptico VE-LX1400 se les tomaron 5 fotografías a 40x en madera temprana a cada una (26 fotografías), debido a que, como dicta la literatura, la madera temprana tiene mayor influencia en el ancho anual (figura 27).



Figura 26. Cortes transversales.



Figura 27. Cámara VE-LX1400 adaptada a microscopio óptico.

Posteriormente, de cada una de las fotografías se analizaron 5 traqueidas con el software *Toupview* de la cámara VE-LX1400. A estas traqueidas (125 por quinquenio) se les midió la longitud del lumen y de la pared doble (figura 28), recopilando así, 1375 mediciones de pared doble y 1375 de lumen.

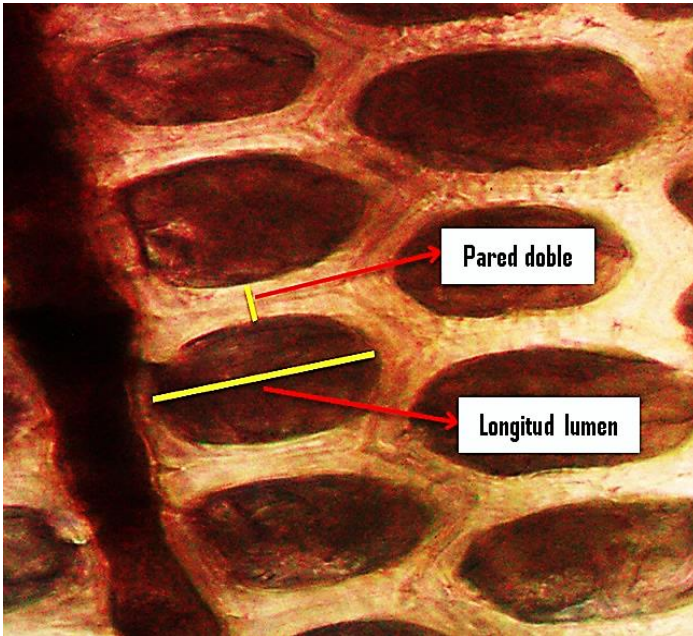


Figura 28. Fotografía de corte transversal de *Abies religiosa* observado en microscopio óptico a 40x, en la que se aprecian las traqueidas.

9.3 Trabajo de gabinete

Se registraron los periodos de crecimiento anual, con ello se determinó la madera temprana y tardía, confirmando que la primera influye en el ancho total.

Con los registros anuales se calcularon las ganancias netas (Larsson, 2004) normalizando el crecimiento, reduciendo el efecto del crecimiento radial, mediante la fórmula: $G = \frac{x_1}{(x_1+x_2)}$, donde x_1 es el año previo y x_2 el año siguiente; esta ecuación se aplicó a las 20 cronologías.

El tratamiento previo de los registros se realizó de acuerdo a lo descrito por Matalas (1962) y Cropper (1979) a fin de someterlos al análisis estadístico en STATGRAPHICS (Centurion XVI.16.1.15), aplicando las pruebas de correlación (Pearson) y asociación de variables (conglomerados) número de células, lumen y pared doble) y crecimientos anuales con los contaminantes SO_2 , O_3 y NO_x (anexo 1), y con los factores meteorológicos: temperatura mínima, máxima y precipitación (anexo 2), para determinar la relación entre cada uno de ellos.

X. RESULTADOS Y ANÁLISIS

10.1 Anillos de crecimiento de 1960 a 2015

De las virutas extraídas se eligieron las secciones comprendidas por 55 anillos que se formaron a partir del inicio de la contaminación del aire en la Ciudad de México (1960). Con ello se removió el efecto del crecimiento más rápido (primeros diez a quince años) en la vida del oyamel.

La cronología de los registros de los anillos de crecimiento (total temprano y tardío) de los años 1960 a 2015, sin remover el efecto del crecimiento radial (tratamiento estadístico) se muestran en la figura 29. Los crecimientos totales se registraron entre 0.923 y 5.478 milímetros. La media (\bar{x}) del crecimiento total fue de 2.36 mm con una desviación estándar (σ) de 1.07 mm, por su parte el crecimiento temprano tuvo $\bar{x}=1.74$ mm y $\sigma=0.85$ mm, y el tardío tuvo $\bar{x}=0.62$ mm y $\sigma=0.25$ mm. En la cronología se determinaron cinco etapas:

1. 1960-1975. En esta se presentaron los anillos más anchos, en su mayoría midiendo más de 3 mm, y alcanzando en 1964 los 5.48 mm. Esta etapa reveló un decremento constante hasta el inicio de la segunda
2. 1976-1983. Esta etapa mantuvo un aumento del crecimiento durante los primeros dos años y posteriormente comenzó a disminuir.
3. 1984-2003. Esta conservó un crecimiento regular todos los años, sus medidas fueron menores a 2 mm, por lo cual esta presentó los anillos más estrechos, siendo los años más reducidos 1988 y 1996.
4. 2004-2009. Esta etapa presentó un aumento en el tamaño anual, alcanzando algunos los 3 mm.

5. 2010-2015. En esta etapa hubo un decremento, teniendo anchos por debajo de 2 mm.

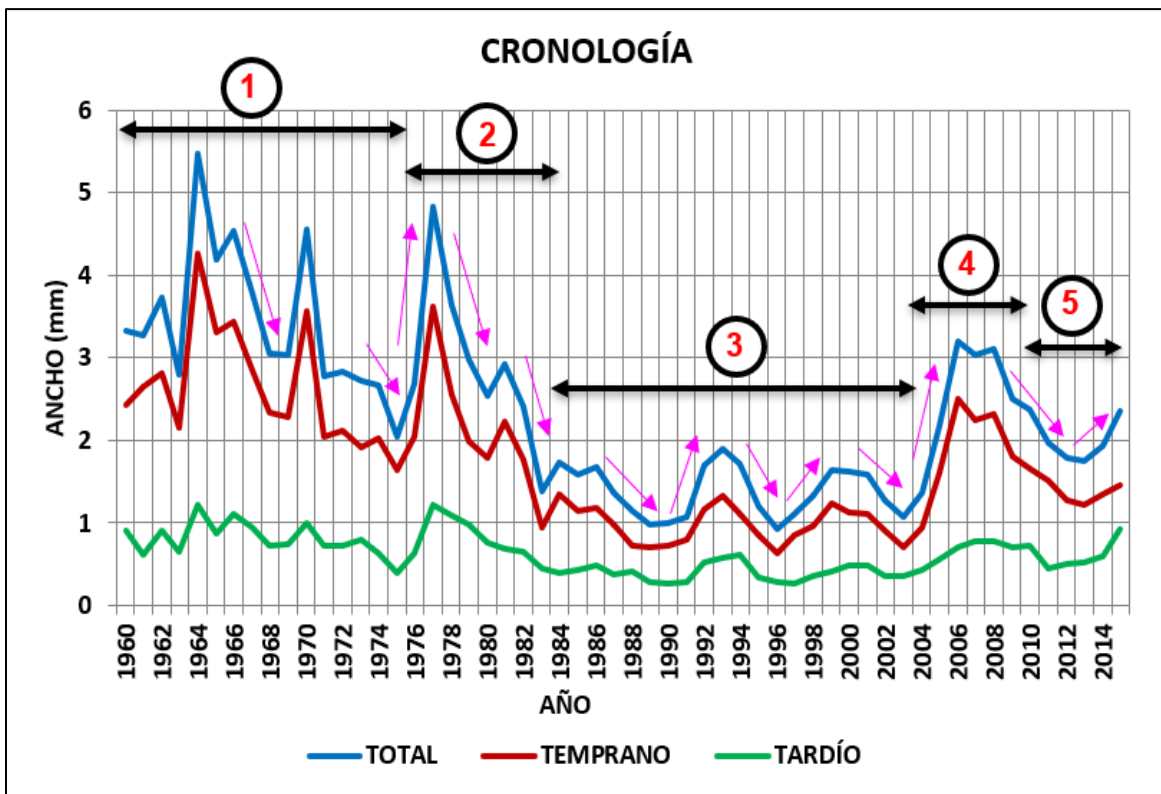


Figura 29. Cronología de anillos de crecimiento de 1960-2015.

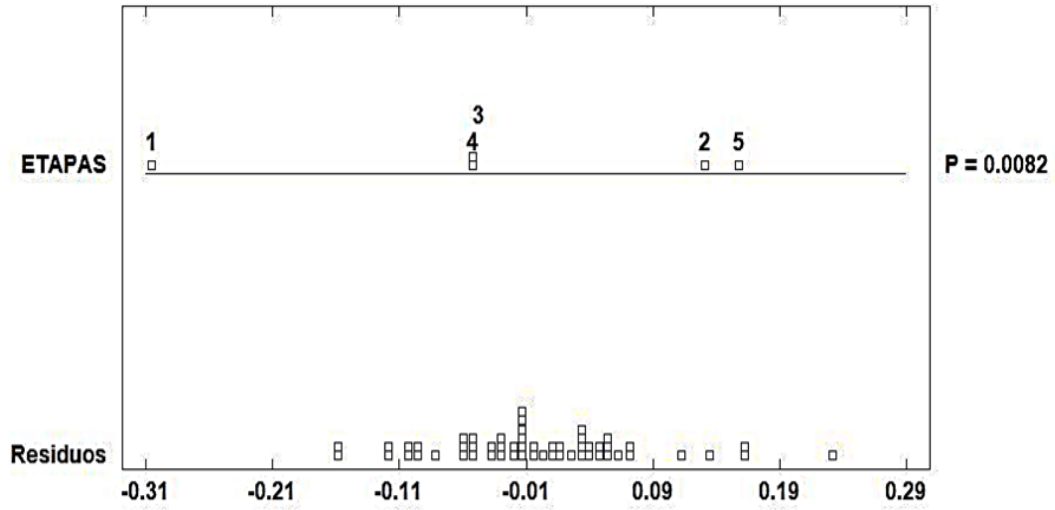
En el cuadro 2 se muestran la media y la desviación estándar de cada una de las etapas. En la primera (1961-1975) se presentaron los años de mayor crecimiento, teniendo una media del crecimiento total de 3.43 mm, es decir, por arriba de la media total de la cronología, la cual fue de 2.36 mm, y una desviación estándar menor al milímetro. Los años de menor crecimiento se presentaron en la tercera etapa (1984-2003), la cual presentó una media de crecimiento total de 1.38 mm, es decir, por debajo de la media de la cronología, y una desviación estándar de 0.31 mm, lo que revela que el crecimiento varió poco en esos años.

Cuadro 2. Media y desviación estándar por etapas.

ETAPA	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
1960-1975		
Total	3.43	0.93
Temprana	2.63	0.74
Tardía	0.80	0.21
1976-1983		
Total	2.92	1.00
Temprana	2.12	0.77
Tardía	0.81	0.26
1984-2003		
Total	1.38	0.31
Temprana	0.98	0.22
Tardía	0.40	0.10
2004-2009		
Total	2.56	0.71
Temprana	1.90	0.58
Tardía	0.66	0.14
2010-2015		
Total	2.03	0.27
Temprana	1.41	0.16
Tardía	0.62	0.18

Las etapas 3 y 4 son las que representan un crecimiento diferenciado entre sus varianzas entre las etapas con resto al resto, pese a que la mayor amplitud la realiza el crecimiento tardío (verano). Con las pruebas de rangos (figura 30) las etapas 3 y 4 son los grupos homogéneos

ANOVA Gráfico para CREC. TARDÍO



ANOVA Gráfico para CREC. TEMPRANO

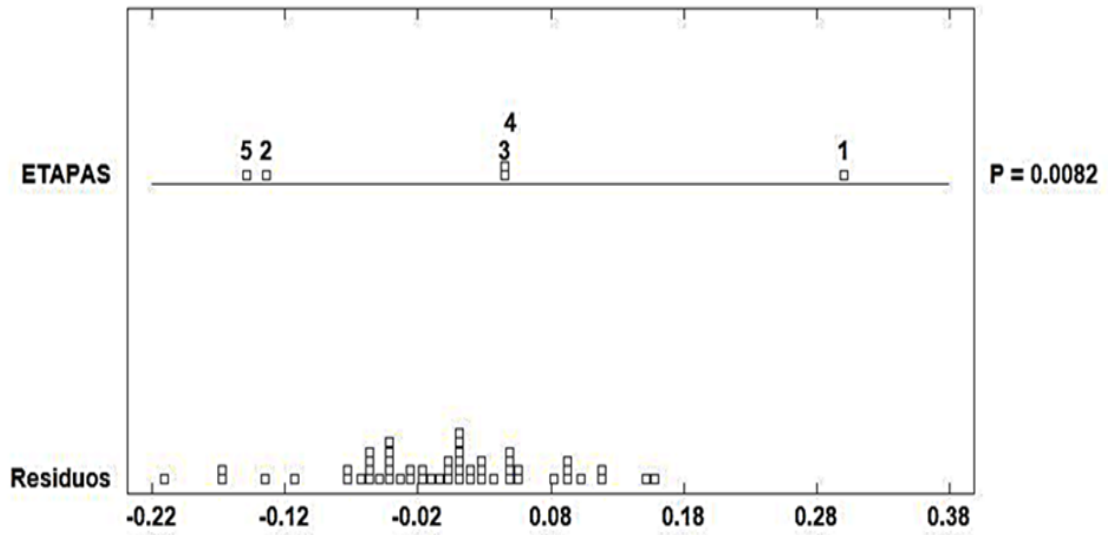


Figura 30. Prueba de rangos por etapas para crecimiento temprano y tardío.

En el cuadro 3 se muestra un resumen de los principales periodos de aumento ($\bar{x}=1.43$ mm) y disminución ($\bar{x}=1.21$ mm) del crecimiento anual, señalando los anchos (mm) que se presentaron en esos años, y su variación ($|x_2-x_1|$). Se observan sombreados los periodos que están por debajo de las medias.

Como se nota, los intervalos de años con mayor crecimiento fueron 1995-1977 y 2003-2006, teniendo incrementos netos por arriba de la media; mientras que los de menor crecimiento (por debajo de la media) fueron 1972-1975, 1985-1990, 1993-1996 y 1999-2003. Estos resultados concuerdan con Alvarado *et al.* (1993) y Bauer (1972) quienes documentaron una reducción drástica en el ancho del anillo y daño por ozono en acículas en los árboles en declive a partir de los años setenta en el sitio de estudio.

Cuadro 3. Periodos de aumento y disminución del crecimiento.

	Temprana (mm)	Tardía (mm)	Total (mm)	Total $ x_2-x_1 $
AUMENTO				
1975-1977	1.64-3.62	0.39-1.21	2.03-4.83	2.8
1990-1993	0.73-1.32	0.26-0.58	0.99-1.90	0.91
1996-1999	0.63-1.23	0.26-0.41	0.92-1.64	0.72
2003-2006	0.71-2.50	0.35-0.70	1.07-3.20	2.13
2013-2015	1.22-1.46	0.52-0.92	1.75-2.36	0.61
				$\bar{x}=1.43$ mm
DISMINUCIÓN				
1966-1999	2.28-3.43	0.71-1.10	3.03-4.53	1.5
1972-1975	1.64-2.11	0.39-0.80	2.03-2.83	0.8
1977-1980	1.79-3.62	0.75-1.21	2.54-4.83	2.29
1981-1983	0.94-2.23	0.45-0.69	1.39-2.91	1.52
1986-1990	0.71-1.19	0.26-0.48	0.99-1.68	0.69
1993-1996	0.63-1.32	0.29-0.58	0.92-1.90	0.98
1999-2003	0.71-1.23	0.35-0.49	1.07-1.64	0.57
2008-2013	1.22-2.31	0.45-0.79	1.75-3.10	1.35
				$\bar{x}=1.21$ mm

Flamand y Huerta (1964) reportan que el ancho de los anillos de crecimiento de oyamel es de aproximadamente 5 mm, en el presente estudio esa medida se presentó solamente una vez durante los años en estudio. El crecimiento de madera temprana presentó anchos de 0.63-4.26 mm y la madera tardía anchos de 0.26-1.21 mm. Huerta (1978) en la misma especie obtuvo madera temprana con anchos de 3.35-6.10 mm y madera tardía con 0.36-2.00 mm; por lo cual, el espesor de los anillos de crecimiento de oyamel en el Desierto de los Leones son menores en comparación a lo reportado por los autores mencionado, principalmente el ancho de los crecimientos total y temprano. La relación de madera temprana y tardía respecto al ancho total, fue del 73% y 27% respectivamente, lo que significa que, el ancho de la madera temprana está relacionado directamente con el ancho total del anillo, como lo citan Xu *et al.* (2014).

En consecuencia, a lo anterior surgen las preguntas *¿el número de traqueidas, la medida de la pared o el lumen determinan la amplitud del anillo?* y *¿cuáles son los factores que contribuyen para que el oyamel se encuentre en un estado de declinación?*

10.2 Contaminantes del aire de la Ciudad de México vs anillos de crecimiento

Los años de menor crecimiento (barras azules) coinciden con los registros de mayores concentraciones de contaminantes (figura 31) obtenidos del programa de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), cuyos registros oscilan entre las 7.1-55.8 ppb de SO₂ (línea roja), 33.6-64.2 ppb de O₃ (línea verde) y 32.5-78.4 ppb de NO_x (línea morada). Las zonas sombreadas muestran los niveles en los que las concentraciones son dañinas para las plantas (>30 ppb de SO₂, >30 ppb de NO_x, y >40 ppb de O₃).

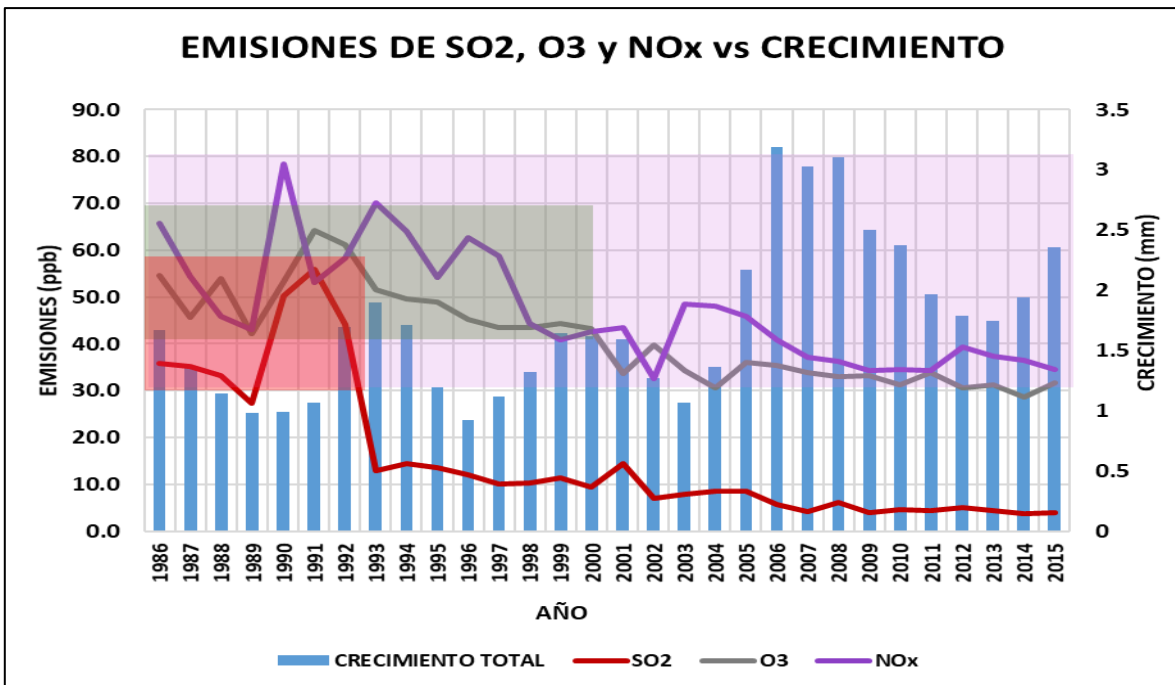


Figura 31. Emisiones de contaminantes vs crecimiento anual.

Como se aprecia en la figura 31, desde el año 1986 comenzó a realizarse el registro, hasta 1992 los tres contaminantes superaron los niveles tóxicos para las plantas, el O₃ mantuvo esa conducta hasta el año 2000 y los NO_x hasta 2015.

De manera simultánea al estrés atmosférico, se encontraron anomalías en las cronologías, siendo muy evidentes los microanillos (anillos falsos), estos se pueden observar en la siguiente figura (32), las flechas rojas indican estas anomalías, las cuales según Barniak y Krapiec (2016) son una respuesta de los árboles a los factores climáticos y antropogénicos adversos.

Los contaminantes del aire en la Ciudad de México, como primer efecto, alteran el registro de la frecuencia de lluvias (Jauregui, 2002), las partículas se comportan como núcleos de condensación, aglutinan en el aire el vapor de agua transpirado por las plantas, produciendo lluvias incipientes fuera de la temporada. Así los arboles del ecosistema boscoso registran “temporada de lluvias o de sequía” modificando el comportamiento de su metabolismo para producir biomoléculas (azúcares, lípidos y proteínas) entre otras no menos importantes, preparando sus células y regular su ciclo de vida.

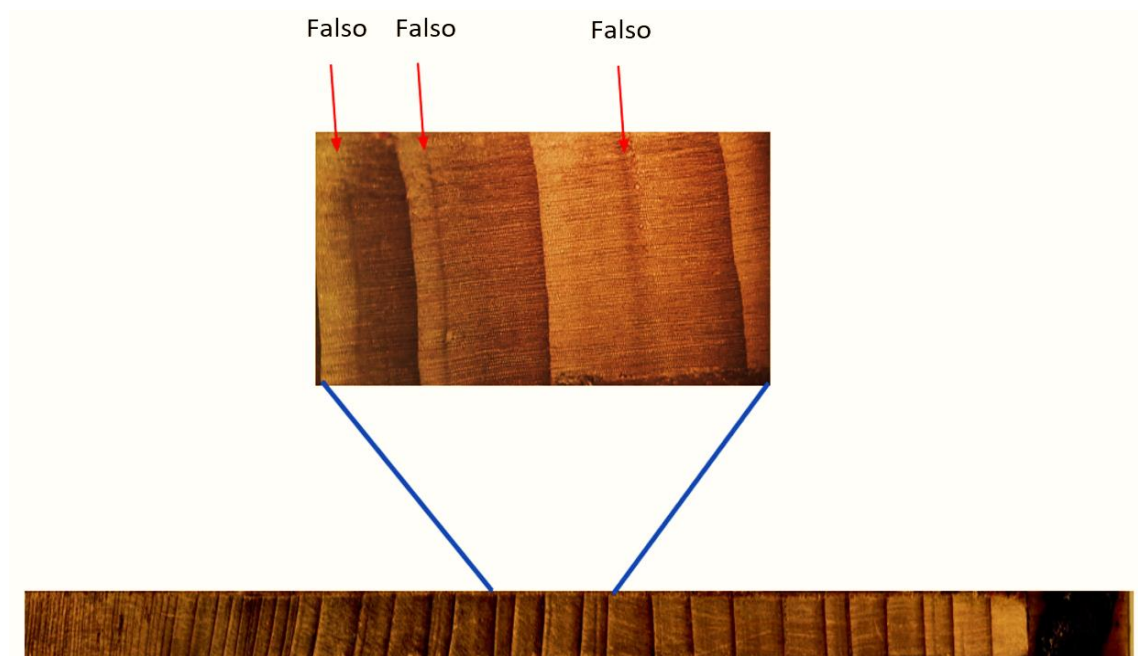


Figura 32. Anomalías observadas en las virutas cuando se realizaba el prefchado de las cronologías.

10.3 Ganancias

Considerando el total de las virutas (20) el promedio de las ganancias de los anillos anuales osciló entre 0.343 y 0.638; siendo que a medida que aumenta la superficie a cubrir (área basal), el número de células aumentaría y el espesor de su pared disminuiría en condiciones ambientales óptimas (CO₂, agua y temperatura).

Las ganancias individuales menores se presentaron en los años 1963, 1975, 1976 y 1991, los cuales estuvieron por debajo de 0.4 mm, seguidos de los años 1969, 1983, 1997, 1998, 2003 2004 y 2005, que tuvieron ganancias que no pasaron de 0.45 mm. Por su parte, las ganancias mayores se encontraron en los años 1970 y 1982, los cuales estuvieron por arriba de 0.6 mm, seguidos de los años 1962, 1964, 1967, 1970, 1974, 1977, 1978, 1982, 1988, 1994, 1995, y 2014 los cuales presentaron ganancias mayores a 0.55 mm (figura 33).

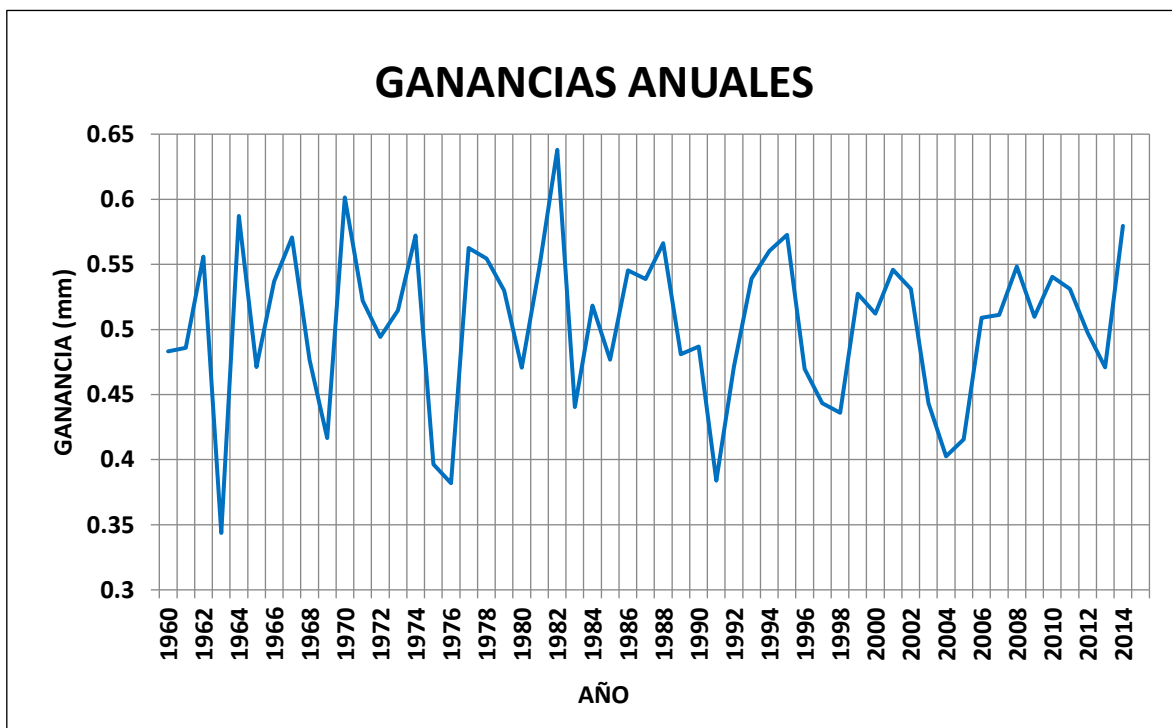


Figura 33. Ganancias anuales 1960-2015.

En el cuadro 4 se muestran las ganancias mínimas (sombreadas) y máximas por quinquenio, presentándose la mayor ganancia absoluta de crecimiento en 1960-1965, y la menor en los quinquenios 1985-1990 y los localizados entre 1995-2015, lo cual significa que, en estos años la variación del crecimiento neto fue menor que en los demás. Estos resultados coinciden con los periodos de decremento tratados anteriormente.

Cuadro 4. Tasas de crecimiento por quinquenio.

QUINQUENIO	GANANCIA MÍNIMA	GANANCIA MÁXIMA	$ x_2-x_1 $
1960-1965	0.344	0.587	0.243
1965-1970	0.416	0.601	0.185
1970-1975	0.396	0.572	0.176
1975-1980	0.382	0.562	0.181
1980-1985	0.440	0.638	0.197
1985-1990	0.481	0.566	0.085
1990-1995	0.384	0.573	0.189
1995-2000	0.436	0.527	0.091
2000-2005	0.403	0.546	0.143
2005-2010	0.509	0.548	0.040
2010-2015	0.471	0.580	0.109
			$\bar{x}=0.149$

Existe una alternativa que McClenahen (1995) determinó y consiste en realizar una cronología de árbol saludable, para hacer una comparación directa de las tasas de crecimiento relativas entre la serie del *ancho de anillo promedio saludable* y la *serie de árboles muertos o insalubres individuales*. Las series de tiempo que constan de las proporciones anuales de series de árboles muertos o poco saludables con ancho de anillo promedio de la subpoblación saludable se calcularon para los años t de la cronología como en la medida y se graficaron los

resultados. El incremento anual de área basal también podría usarse. En cualquier caso, una estructura de bosque de edad uniforme es una condición previa, de lo contrario, tasas de crecimiento radicalmente diferentes podrían enmascarar patrones de crecimiento relativamente decrecientes en árboles individuales.

En la figura 34 se aprecia la amplitud de los anillos medidos, la cual fue menor a partir de los años ochenta, en comparación con los años anteriores.



Figura 34. Ilustración de las diferencias en la amplitud de los anillos medidos y la proporción ocupada por el crecimiento temprano y tardío.

10.4 Numero de células

Los quinquenios con mayor número de células fueron los comprendidos entre 1995-2010, mientras que los de menor número fueron para 1970-1990 (cuadro 5). El número de células y crecimiento anual por quinquenio tuvieron un comportamiento similar de 1960 a 1985, mismo que no se encontró nuevamente hasta 2005-2015. Ambos tuvieron un incremento hasta 1970, seguido de una conducta de reducción-aumento los quinquenios posteriores hasta 1985, después del cual difirieron, para nuevamente coincidir a partir de 2005 (figura 35).

Cuadro 5. Número de células contadas por árbol (WinCELL™).

QUINQUENIO	ÁRBOL										PROMEDIO
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1960-1965	745	940	1027	82	190	106	296	1046	1658	2704	879.4
1965-1970	519	1012	842	160	234	501	735	996	1433	2429	886.1
1970-1975	398	422	239	110	146	159	305	360	672	1032	384.3
1975-1980	119	215	228	208	152	274	426	595	524	1119	386
1980-1985	96	232	257	304	152	209	361	409	285	694	299.9
1985-1990	41	340	630	381	118	129	247	319	1121	1440	476.6
1990-1995	93	904	918	786	597	1043	1640	1346	1089	2435	1085.1
1995-2000	227	762	895	1913	740	1256	1996	1446	1822	3268	1432.5
2000-2010	97	510	1861	1717	453	886	1339	989	2312	3301	1346.5
2005-2010	111	1091	823	1415	610	1089	1699	1031	2356	3387	1361.2
2010-2015	159	491	1545	1527	465	896	1361	733	1511	2244	1093.2
											$\bar{x}=875.53$

Destaca el hecho de que a partir del quinquenio 1985 el comportamiento observado entre el ancho del anillo y las células se invierte, para aumentar el número de células (mitosis) con reducidas amplitudes del anillo. Dos aspectos teóricos derivan de ello, el primero, que las paredes se adelgazas en ambos periodos de crecimiento (temprano y tardío), y que a su éste fuera sustituido por el aumento celular.

Un segundo aspecto, es que al disminuir la fotosíntesis y, por lo tanto, la elaboración de fotosintatos género un déficit en la fabricación de azucares para reponer el follaje, ramas y tronco, en términos del balance fotosíntesis vs respiración, esta última aumentara.

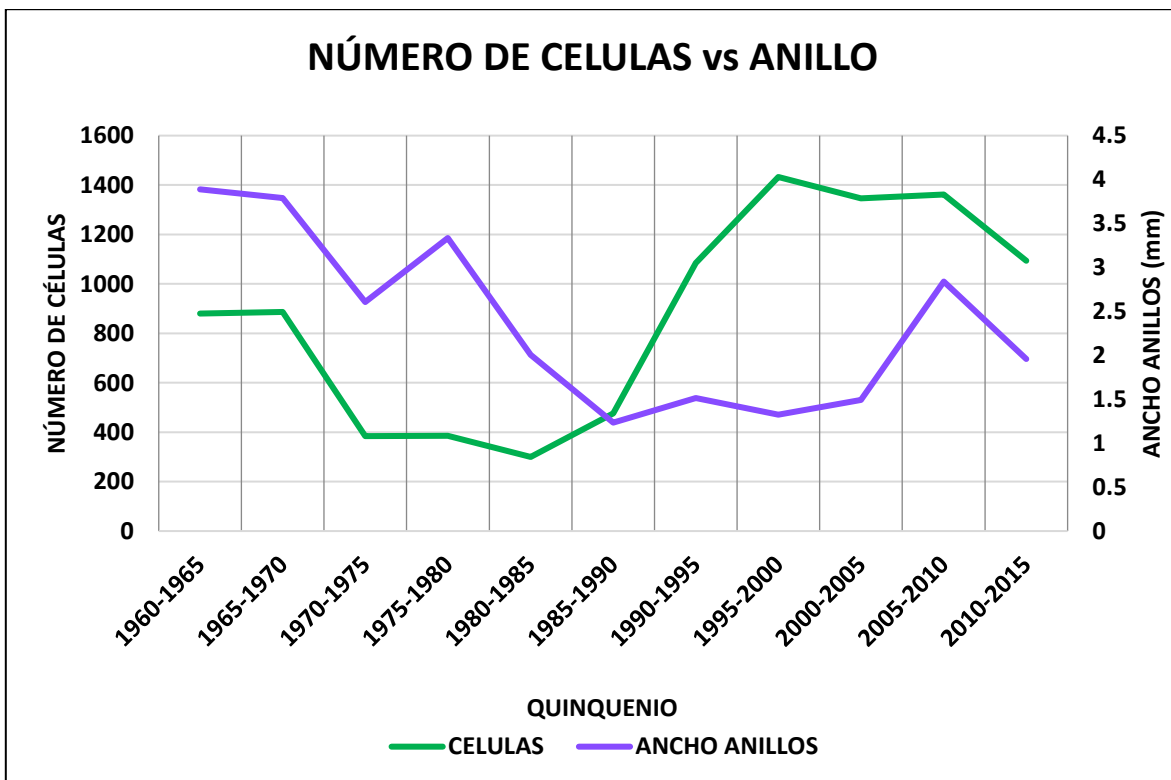


Figura 35. Gráfico de número de células vs crecimiento anual.

Para fines de comparar el número de células registradas en cada uno de los quinquenios se aplicó un análisis de comparación de medias y determinó una diferencia significativa entre los quinquenios 1975 al 1990 (Figura 36).

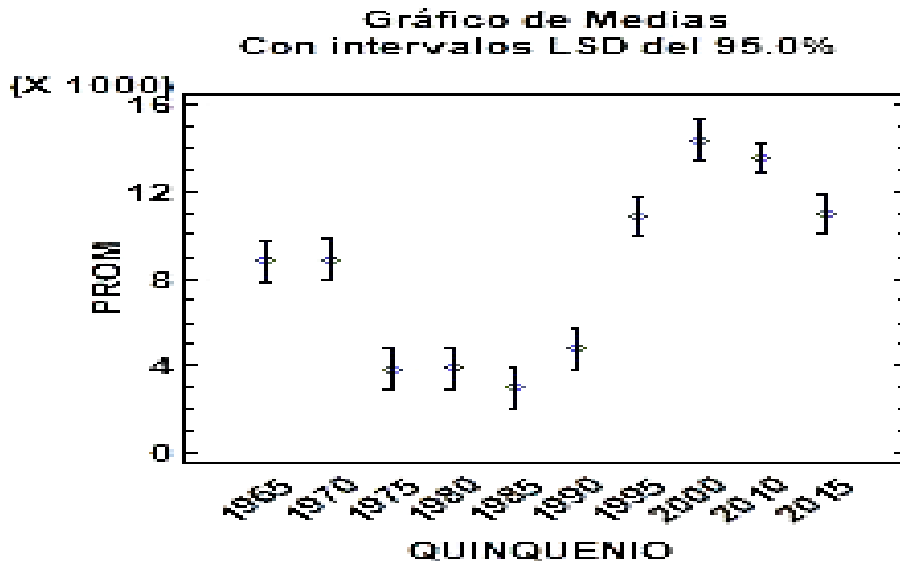


Figura 36. Comparación de medias del número de células en relación al tiempo.

10.5 Longitud lumen

Datos obtenidos con WinCELL™

Los datos se unificaron convirtiéndolos a porcentaje, con el fin de conocer el % de las células totales formadas por quinquenio que se encuentran en cada intervalo de medidas (cuadro 6).

En todos los quinquenios, la medida del lumen que predominó fue 18-24 μm , teniendo todos los quinquenios por arriba del 34% de traqueidas dentro de ese intervalo, seguido por 35-40 μm , intervalo en el cual se encontraron entre el 20% y 24% del total de traqueidas para todos los quinquenios.

Cuadro 6. Porcentaje de células por intervalo de medida en cada quinquenio (WinCELL™).

QUINQUE- NIO	INTERVALO DE MEDIDA (µm)									
	13-18	18-24	24-29	29-35	35-40	40-46	46-51	51-57	57-62	62-68
1960-1965	0.31%	42.71%	0.00%	0.00%	22.77%	17.03%	3.36%	0.00%	11.24%	2.59%
1965-1970	0.16%	39.93%	0.00%	0.00%	23.23%	20.13%	2.79%	0.00%	10.32%	3.43%
1970-1975	0.86%	37.43%	0.00%	0.00%	24.34%	20.97%	2.83%	0.00%	10.55%	3.01%
1975-1980	0.28%	41.34%	0.00%	0.00%	23.53%	18.13%	2.25%	0.00%	11.56%	2.90%
1980-1985	0.35%	40.49%	0.00%	0.00%	23.04%	20.26%	2.54%	0.00%	9.80%	3.52%
1985-1990	0.16%	40.80%	0.00%	0.00%	22.04%	20.43%	3.00%	0.00%	9.61%	3.95%
1990-1995	0.23%	38.59%	0.00%	0.00%	24.69%	19.04%	2.67%	0.00%	12.19%	2.60%
1995-2000	0.08%	38.39%	0.00%	0.00%	22.88%	17.42%	4.25%	0.00%	13.57%	3.42%
2000-2005	0.36%	39.88%	0.00%	0.00%	22.81%	17.38%	4.32%	0.00%	11.83%	3.43%
2005-2010	0.62%	39.61%	0.00%	0.00%	21.62%	17.68%	4.36%	0.00%	12.82%	3.30%
2010-2015	0.31%	34.78%	1.54%	0.00%	20.79%	19.58%	4.90%	0.14%	12.70%	4.95%

Para todos los quinquenios individualmente, más del 50% del total de todas las traqueidas (entre madera temprana y tardía) su lumen fue menor a 40 µm, el cual está por debajo de la media de la medida de lumen que reportan Flamand y Huerta (1964), la cual es de 40.25 µm. Mientras que, el promedio de todos los quinquenios arrojó que el 73% de todas las traqueidas tienen lumen por debajo de la media reportada por esos autores (figura 37).

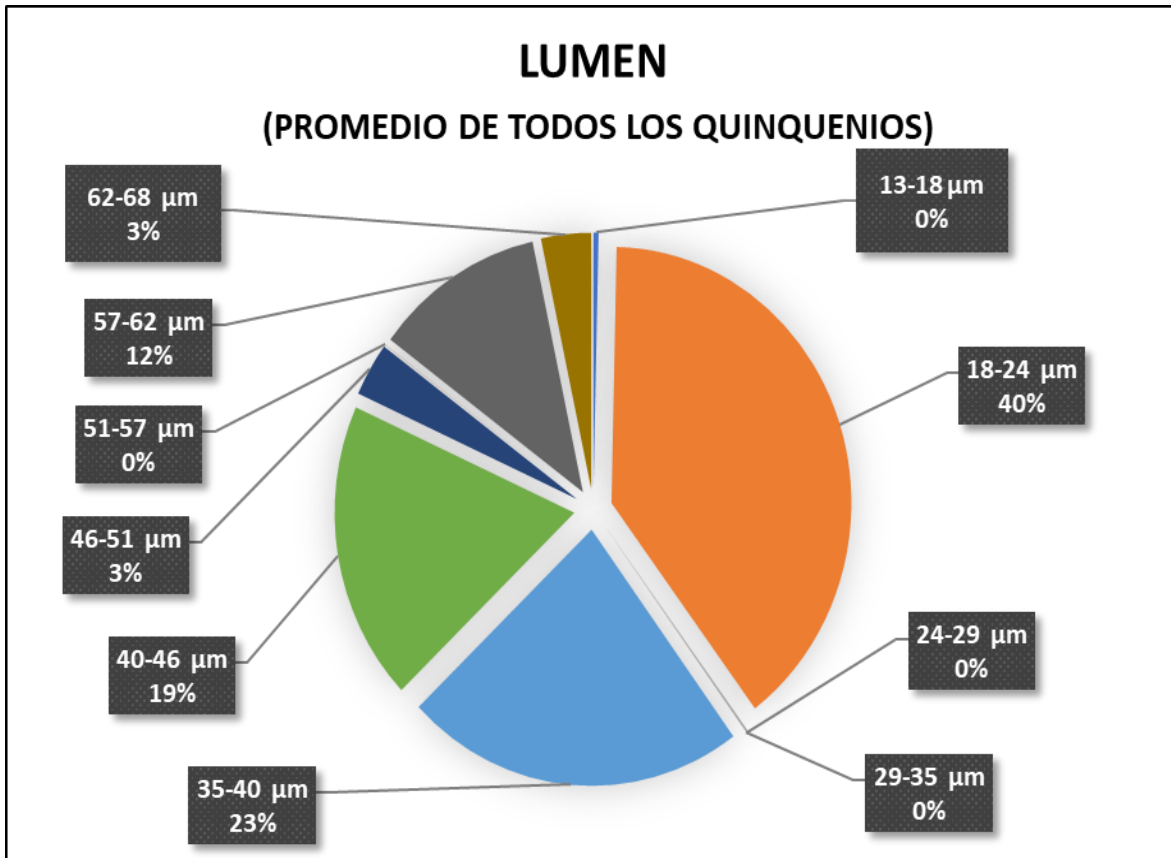


Figura 37. Porcentaje de células por intervalo de medida de lumen, promedio de todos los quinquenios (WinCELL).

Por este método, la diferencia de medidas de lumen por quinquenio no fue evidente, sin embargo, mostró que, el tamaño de esta estructura celular en los oyameles del Parque Nacional Desierto de los Leones tiene en general una medida pequeña.

Datos obtenidos por microtecnica convencional

En la figura 38 se pueden observar los promedios quinquenales de las medidas del lumen en contraste con el crecimiento del anillo.

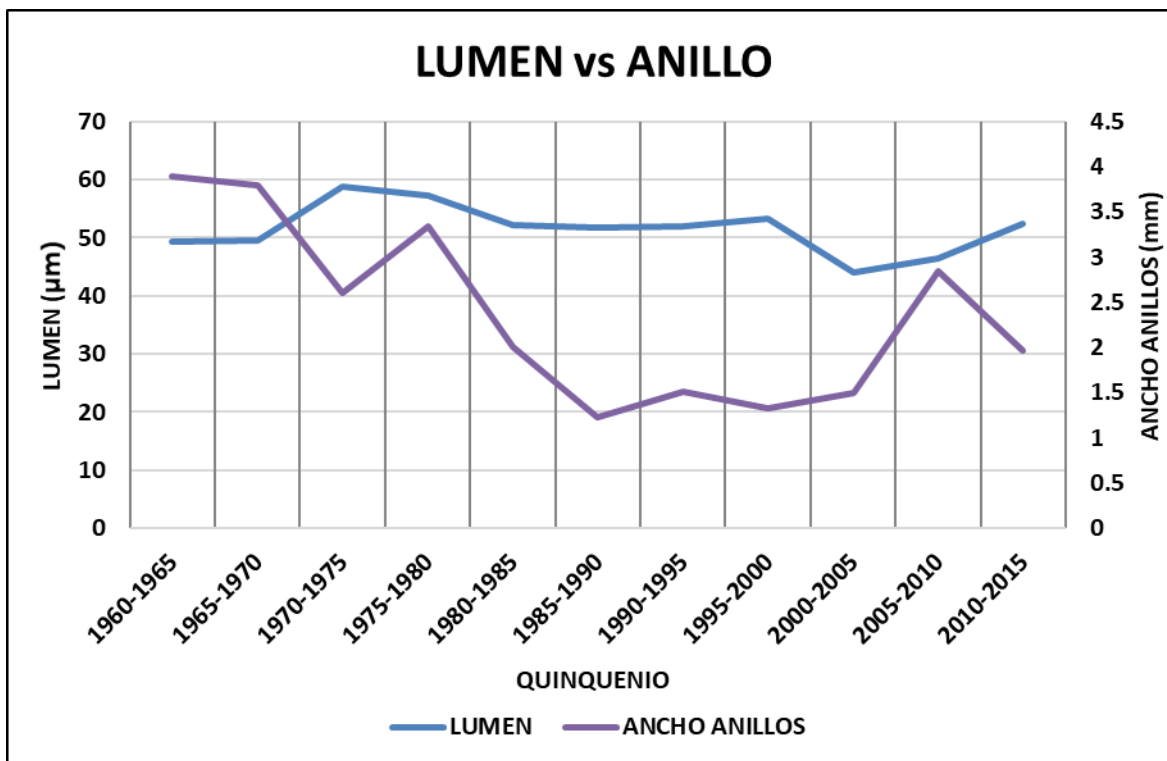


Figura 38. Gráfico de lumen vs crecimiento anual.

Flamand y Huerta (1964) obtuvieron medidas del lumen de 12.5-68 µm (\bar{x} =40.25 µm) en oyameles sanos. En este estudio se observó que, en promedio, el lumen de traqueidas de madera temprana de los oyameles estudiados es de 51.53 µm, con una desviación estándar de 4.02 µm, es decir, están por arriba de la media de lo reportado por los autores. Sin embargo, los datos individuales fueron de 23.19-91.22 µm. Estos son más congruentes a los que registrados por Huerta (1978) para traqueidas de madera temprana, que son de 15-78 µm.

Los quinquenios 1980-1995 estuvieron más cercanos a la media grupal. Los años con una media de longitud de lumen mayor fueron 1970-1980, los cuales incluso salieron del límite de decisión superior. Los años con media de crecimiento menor fueron 1960-1970 y 2000-2010, sin embargo, estos últimos se salieron del límite de decisión inferior (figura 39). Lo anterior coincide con Bernal-Salazar *et al.* (2004), quienes encontraron en el mismo Parque Nacional Desierto de los Leones un aumento en el tamaño del lumen en los años 70.

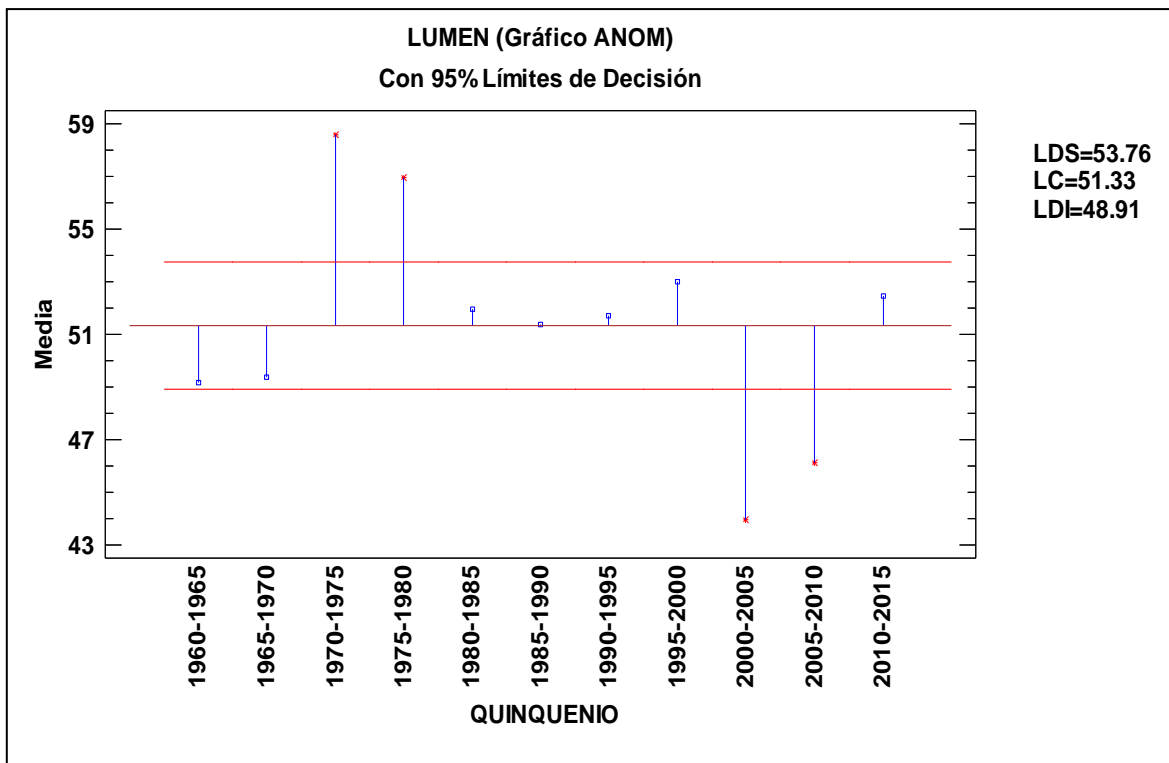


Figura 39. Gráfico de medias ANOM de las medidas de lumen por quinquenio.

10.6 Longitud pared celular doble

Los datos individuales mostraron paredes dobles de 2.54-14.64 μm . Sin embargo, el promedio de la pared doble de traqueidas tempranas fue de 7.28 μm , con una desviación estándar de 0.64 μm (figura 40), estos resultados están por debajo de la media de lo reportado por Flamand y Huerta (1964), quienes mencionaron que la pared doble mide 6-14 μm (\bar{x} = 10 μm). Lo anterior se explica en razón de que las células medidas son de madera temprana, las cuales tienen paredes más angostas que las células de madera tardía.

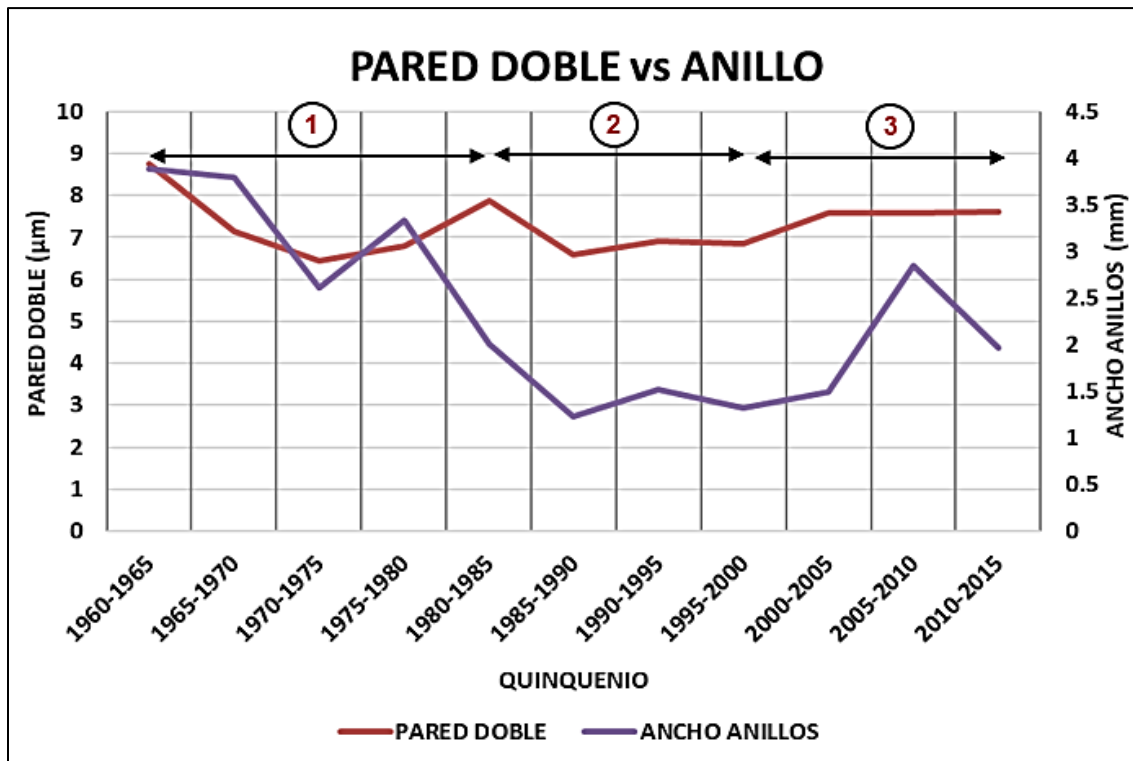


Figura 40. Gráfico de pared doble vs crecimiento anual.

Respecto a toda la cronología, el quinquenio 1965-1970 fue el que más se acercó a la media grupal. Los quinquenios que presentaron la media de sus medidas de pared mayores fueron 1960-1965 y 1980-1985, los cuales superaron el límite de

decisión superior. Por el contrario, los quinquenios que presentaron la media de sus medidas más bajas fueron 1970-1975 y 1985-1990, los cuales estuvieron por debajo del límite de decisión inferior, seguidos de 1975-1980, el cual estuvo cerca del límite (figura 41). Bernal-Salazar *et al.* (2004) encontraron en el mismo sitio de estudio reducciones en la pared celular a partir de los años 70, lo que coincide con lo observado en este estudio.

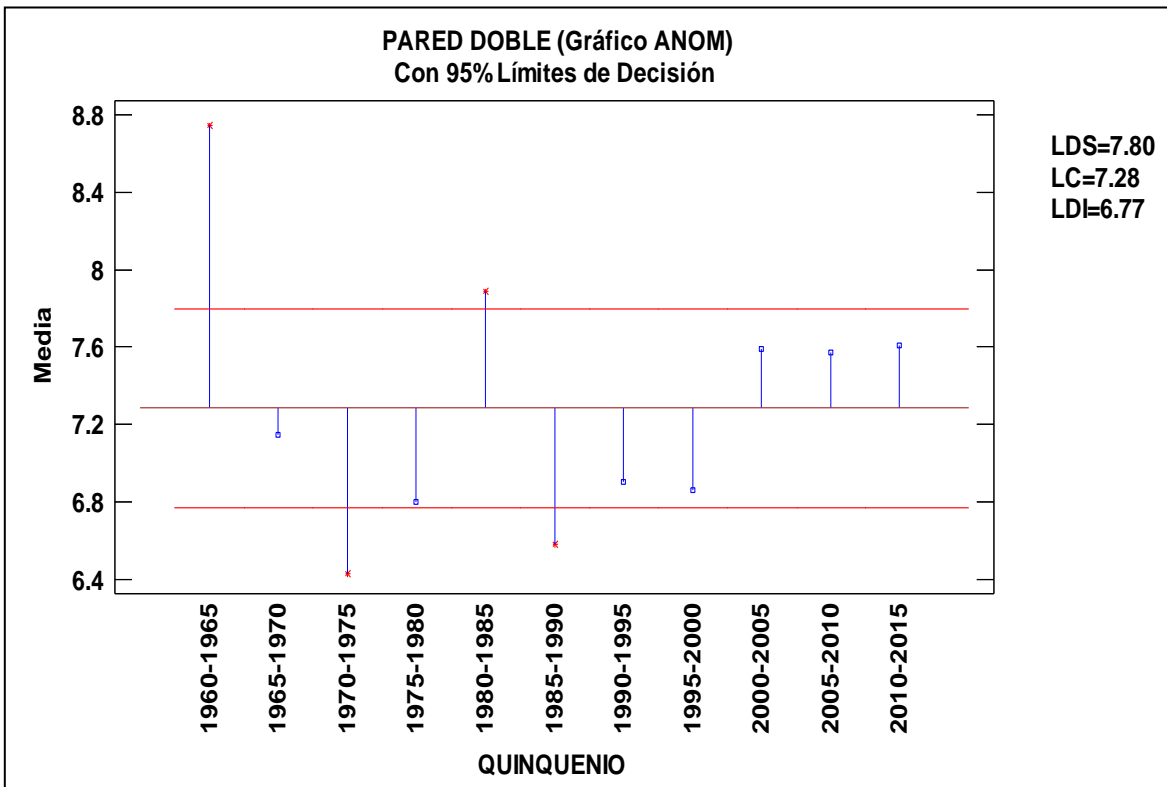


FIGURA 41. Gráfico de medias ANOM de las medidas de pared doble por quinquenio.

La cronología de las medidas de la pared doble por quinquenio se pudo dividir en tres etapas, la primera de 1960-1985, la segunda de 1985-2000 y la tercera de 2000-2015. En el cuadro 7 se presentan la media y la desviación estándar para cada una de estas etapas.

Cuadro 7. Medias y desviaciones estándar de pared doble por etapa.

ETAPA	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
1960-1985	7.40	0.92
1985-2000	6.98	0.43
2000-2015	7.59	0.02

La segunda etapa (1985-2000) presentó las medidas de pared doble menores, teniendo una media de 6.98 μm , es decir, por debajo de la media poblacional que fue de 7.28 μm . Las otras dos etapas (1 y 3) tuvieron una media mayor a la total, siendo la tercera la más alta, sin embargo, la desviación estándar fue mayor en la primera, por lo que los datos en esta se encuentran más dispersos.

El ancho del anillo anual y el ancho de la pared doble tuvieron un comportamiento similar en los quinquenios 1960-1965 y 2005-2010 para los anchos mayores, y de menores en 1990-2000 (figura 42), comportamiento que no fue observado con el lumen.

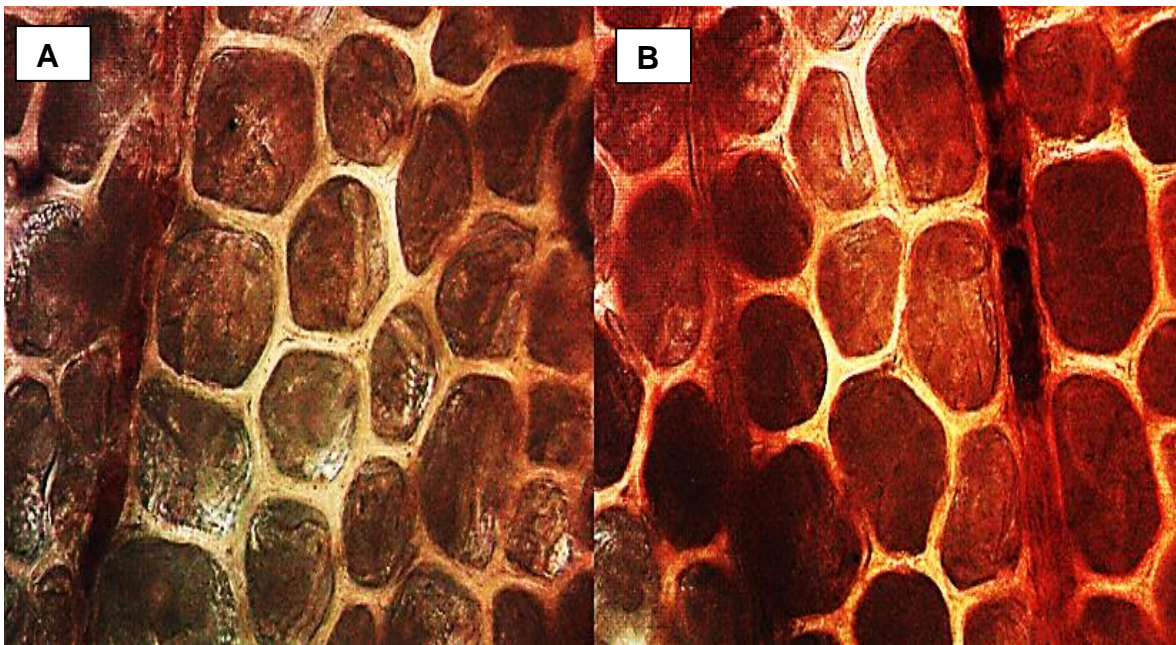


FIGURA 42. Secciones transversales de oyamel donde se aprecia la diferencia en el ancho de la pared celular. A) 1960-1965; B) 1985-1990.

10.7 Análisis de correlaciones y conglomerados

Los resultados de las correlaciones de Pearson se muestran en el cuadro 8. La correlación entre todas las variables confirmó, en primer lugar, la relación mayor de la madera temprana sobre la tardía en el anillo de crecimiento, siendo esta cercana a 1 (0.99%).

En pocos estudios ha sido identificado el parámetro celular de mayor contribución al ancho del anillo, difiriendo en ellos entre el número, como sugirieron Rossi *et al.* (2008), Wodzicki *et al.* (1983; 2001) y Xu *et al.* (2014), o el tamaño de células, específicamente el grosor de la pared, como afirman Deslauriers *et al.* (2008) y Eckstein *et al.* (1989).

En esta investigación, la correlación mostró una relación del anillo de 0.365 con pared doble y de 0.0581 con el lumen, mientras que con el número de células la relación fue inversa (-0.223), es decir, los años de mayor crecimiento mostraron una pared doble mayor pero un menor número de células. Estas relaciones no son significativas, sin embargo, el análisis de conglomerados confirmó que la relación más cercana al anillo fue la de la pared doble, posteriormente el número de células y finalmente el lumen, lo que confirma lo dicho por los últimos autores, coincidiendo también con Silkin y Kirdanov (2003) quienes afirmaron que las paredes traqueidales son un reflejo de la masa del tronco (figura 43).

Cuadro 8. Correlaciones de parámetros celulares vs crecimientos, contaminantes y meteorológicos.

	Temprana	Tardía	Ganancias	Numero de células	Pared doble	Lumen	SO ₂	O ₃	NOx	T° mínima	T° máxima	Precipitación
Crecimiento Total	0.996 0.000	0.947 0.000	0.315 0.020	-0.223 0.510	0.365 0.269	0.058 0.865	-0.482 0.007	-0.490 0.006	-0.483 0.007	-0.351 0.009	0.046 0.741	-0.206 0.134
Temprana		0.914 0.000	0.286 0.036	-0.216 0.524	0.389 0.236	0.039 0.909	-0.438 0.020	-0.448 0.017	-0.439 0.019	-0.353 0.0090	0.043 0.757	0.052 0.711
Tardía			0.394 0.003	-0.239 0.478	0.262 0.436	0.126 0.711	-0.044 0.018	-0.423 0.025	-0.380 0.046	-0.318 0.019	0.052 0.711	-0.217 0.114
Ganancia				-0.395 0.229	-0.076 0.825	0.124 0.717	-0.175 0.365	-0.075 0.697	-0.118 0.543	-0.020 0.886	0.084 0.549	-0.716 0.208
Número de células					0.219 0.518	-0.640 0.034	-0.807 0.052	-0.482 0.332	-0.520 0.290	0.284 0.397	-0.227 0.501	0.568 0.069
Pared doble						-0.550 0.080	-0.848 0.033	-0.892 0.017	-0.896 0.016	0.055 0.871	0.096 0.780	-0.135 0.692
Lumen							0.356 0.489	0.491 0.323	0.429 0.396	-0.031 0.929	0.281 0.402	-0.484 0.132
SO₂								0.838 0.000	0.618 0.000	-0.054 0.784	0.774 0.649	-0.090 0.649
O₃									0.716 0.000	-0.075 0.703	0.066 0.736	-0.103 0.000
NOx										-0.1426 0.469	-0.029 0.885	0.185 0.347
T° mínima											0.681 0.000	-0.121 0.382
T° máxima												-0.450 0.000

Correlación
Valor -P. Nivel de confianza 95%

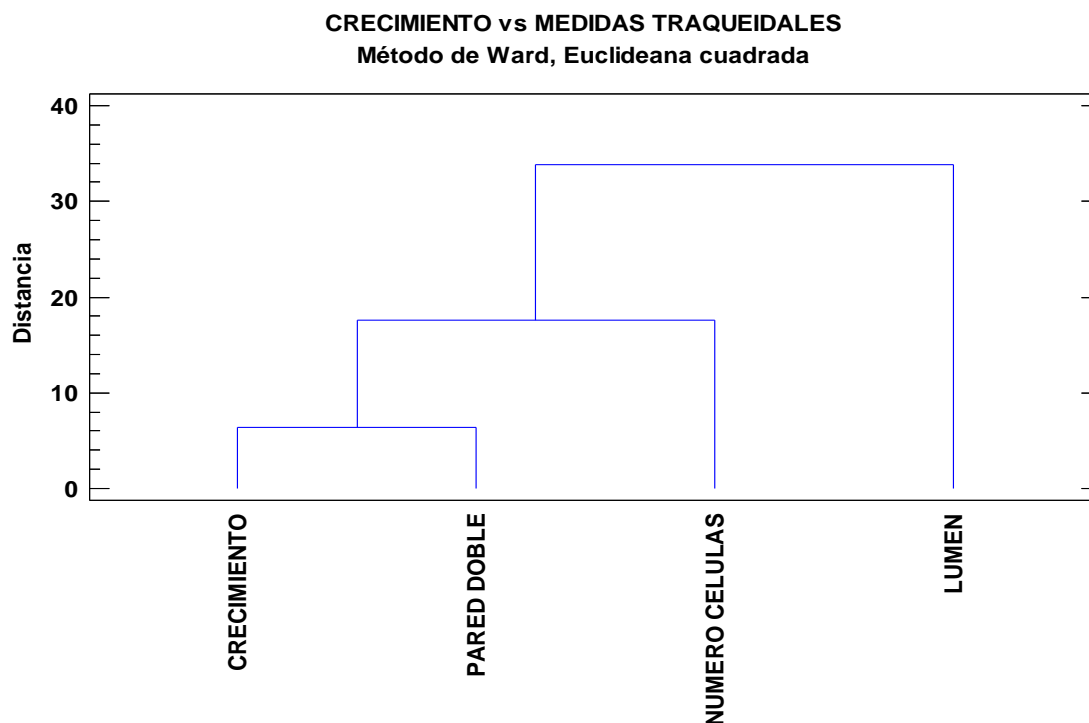


Figura 43. Dendrograma de crecimiento anual y parámetros traqueidales.

En cuanto a la relación de los contaminantes con el crecimiento total del anillo, los tres gases mostraron relación inversa significativa cercana a -0.5, siendo el O₃ (-0.490) el de mayor influencia en el crecimiento, seguido de los NO_x (-0.483) y por último el SO₂ (-0.482); el mismo comportamiento se presentó en el crecimiento temprano y tardío, viéndose más afectado el primero.

En la correlación de los contaminantes con los atributos celulares, el número de células y la pared doble mostraron relación inversa con los tres, siendo significativas únicamente las de la pared, las cuales estuvieron cerca del -1 para los tres: NO_x (-0.896), O₃ (-0.892) y SO₂ (0.848). El lumen mostró relaciones directas respecto a los tres contaminantes, sin embargo, estas no son significativas. Esto comprueba que la relación más estrecha con el anillo de crecimiento la tiene la pared, ya que ambos tuvieron un comportamiento similar ante la presencia de estos

gases, mismo que se observó en la gráfica "Pared doble vs anillo" presentada anteriormente. Coincidente con lo anterior, Baucker *et al.* (1996) y Schweingruber y Voronin (1996) obtuvieron una escasa acumulación de pared celular en árboles de *Picea abies* y *Pinus obovata* dañados por la contaminación. Bernal-Salazar *et al.* (2004) atribuyen los cambios traqueidales en la zona de estudio al estrés causado por la contaminación del aire, especialmente al ozono, resultado que concuerda con el de este estudio.

Los años en los que se encontraron las medidas de anillos y traqueidales menores estuvieron entre 1980 y 2005. Los datos obtenidos de la RAMA (anexo 1) indican que, los años con mayores emisiones de SO₂, O₃ y NO_x estuvieron desde 1986, cuando se inició el registro de la contaminación, hasta 1997, y se ha reducido al paso de los años. Los impactos del ozono aumentaron en 1986, cuando Pemex introdujo una nueva gasolina (Cibrián, 1989). El efecto más grande que tienen el ozono y los óxidos de nitrógeno en la reducción del crecimiento puede deberse a que las concentraciones de estos en la atmósfera han superado los límites tóxicos para las plantas (>40 y >30 respectivamente) prevaleciendo hasta los últimos años, mientras que las concentraciones tóxicas de dióxido de azufre se presentaron antes de 1992 y a partir de entonces han disminuido; además de que las industrias que emiten este gas se encuentran al norte de la ciudad, siendo menores las concentraciones que llegan al bosque en comparación con las de los otros contaminantes. El hecho de que los anillos más estrechos se presentaran hasta 2003, cuando las emisiones de contaminantes ya habían disminuido, puede deberse a que, el efecto de estos tiende a ser duradero, aunque las concentraciones activas hayan disminuido (Muzika *et al.*, 2004).

En cuanto a los factores meteorológicos, el crecimiento anual tuvo relación inversa significativa con la temperatura mínima (-0.351), es decir, a menor temperatura mayor crecimiento, o a mayor temperatura menor crecimiento. El número de células mostró relación directa con la precipitación (0.568) y relación inversa con la temperatura máxima (-0.227), es decir, altas precipitación genera mayor producción celular, mientras que los tiempos de secas la disminuyen. La pared doble presento una baja relación lineal con las temperaturas máxima y mínima (0.096 y 0.055, respectivamente), e inversa con la precipitación (-0.135). El lumen presento relación directa con temperatura máxima (0.281) e inversa con la precipitación (-0.484), lo que se interpretaría como, a mayor precipitación menor lumen.

Fritts *et al.* (1965) proponen que en un ambiente sano y sin influencia de factores antropogénicos, el ancho del anillo anual disminuye proporcionalmente cuando disminuye la precipitación, sin embargo, este factor no correlacionó con los crecimientos anuales, ya que, en los años con menor crecimiento, se presentaron las precipitaciones más altas (figura 44). Esto concuerda con Alarcón *et al.* (1993) quienes no encontraron ninguna correlación entre la anchura del anillo y la precipitación en la cuenca de la Ciudad de México. Tolunay (2003) y Song *et al.* (2009) encontraron anillos más estrechos en condiciones meteorológicas favorables, por lo cual atribuyeron la relación en la disminución de los anillos anuales con los contaminantes atmosféricos.

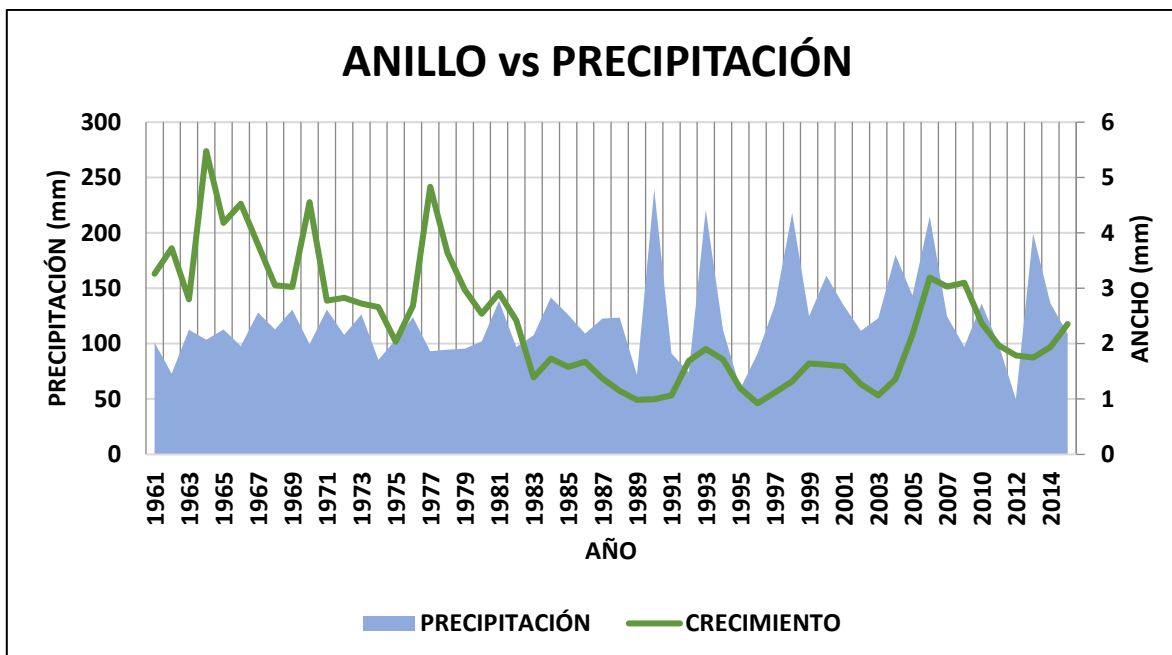


Figura 44. Gráfico de crecimiento y precipitación pluvial anual (Datos obtenidos del SMN, consultados en <https://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>).

Las temperaturas máximas sí pueden estar afectando el crecimiento, ya que, en los años de menor incremento estuvieron tuvieron lugar las temperaturas mayores (figura 45). El aumento de las temperaturas puede acelerar la evaporación del agua, causando déficits hídricos y la inhibición del aparato fotosintético, lo que provoca la producción de anillos más estrechos, y anillos falsos (Pallardy, 2008), esto explica también los numerosos anillos falsos encontrados en las virutas. Como el crecimiento de oyamel está vinculado a su sensibilidad al incremento de las temperaturas, se atribuye que uno de los principales factores en los que está influyendo la contaminación atmosférica es la temperatura, ya que como mencionan Muzika *et al.* (2004) los contaminantes, especialmente el ozono, predisponen a los árboles a las sequias. Dudley y Stolton (2014) sugieren que la contaminación del aire también contribuye a los cambios observados en el clima.

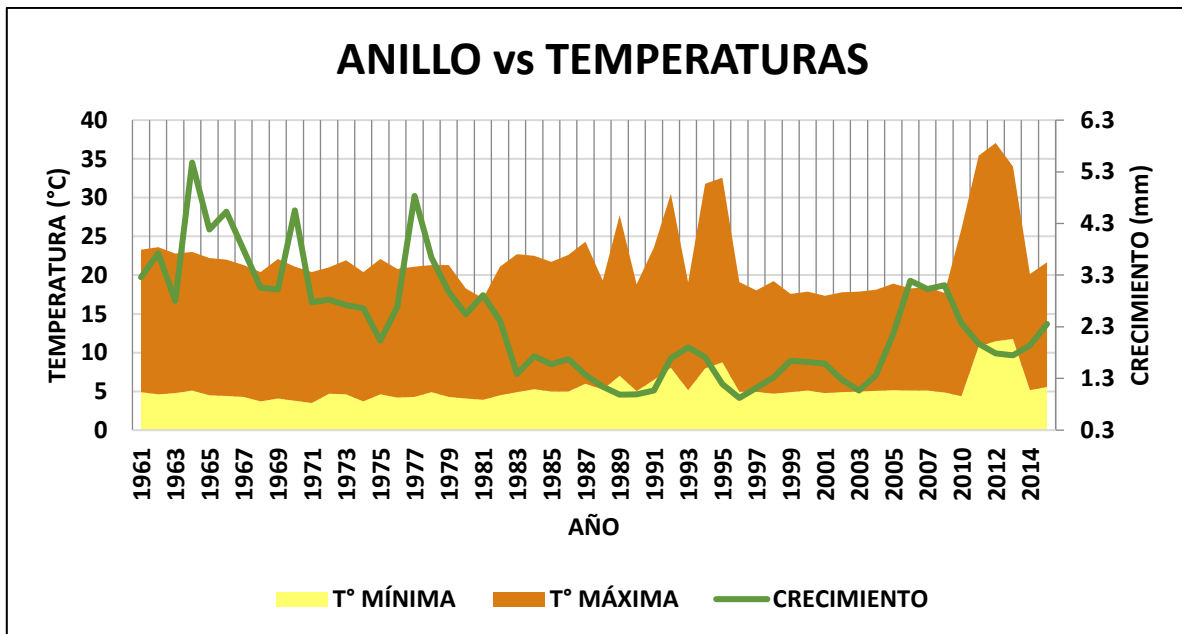


Figura 45. Gráfico de crecimiento y temperaturas máxima y mínima (Datos obtenidos del SMN, consultados en <https://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>).

El análisis de conglomerados de todas las variables estudiadas (figura 46) mostró que la relación más cercana la tuvo el crecimiento anual con el de madera temprana, así como su relación con la pared doble. La segunda relación en orden de cercanía la tuvieron los contaminantes O₃ y NO_x, relacionados en seguida con el SO₂, debido a que, a través de los años, los primeros dos han tenido concentraciones más parecidas que este último. También se observa la relación del número de células con la precipitación y del lumen con las temperaturas. Por lo que se puede decir que, estos factores están influyendo individualmente en esos parámetros celulares.

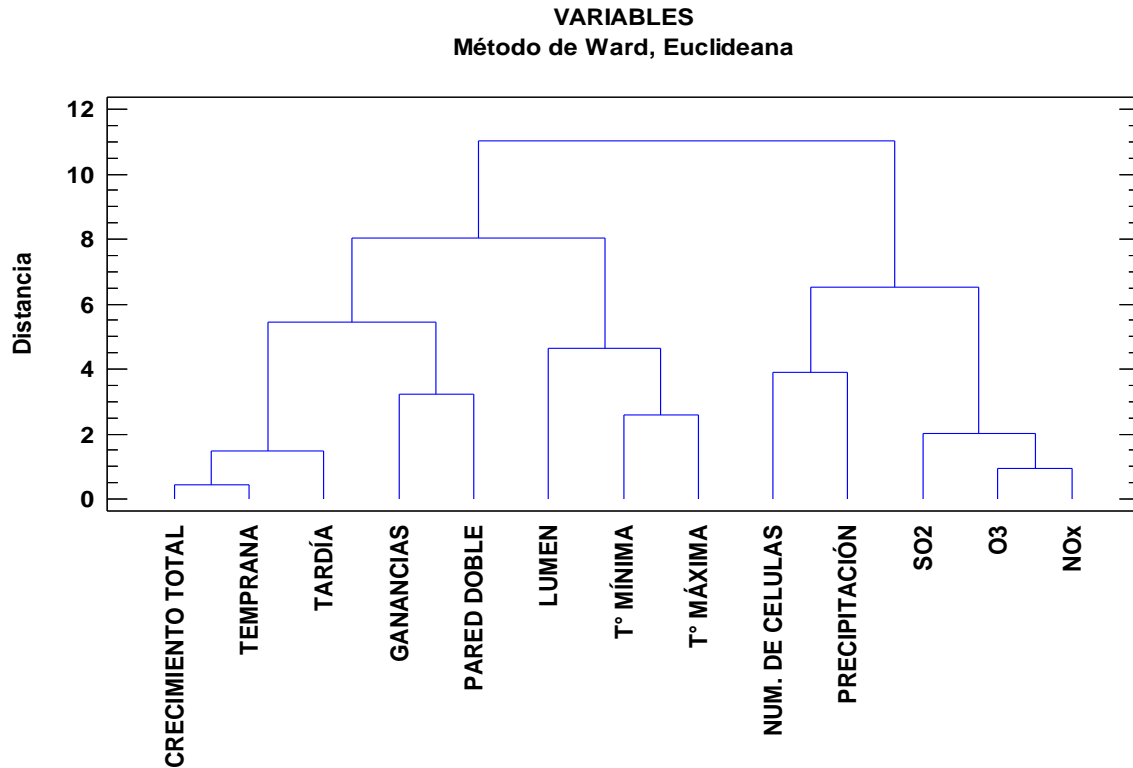


Figura 46. Dendrograma de crecimiento anual y parámetros traqueidales con contaminantes y meteorológicos.

La hipótesis de Graybill (Schweingruber, 1988) señala los factores que afectan el crecimiento de los árboles incluyen la edad del árbol, la condición fisiológica, el clima (factores meteorológicos), el daño por insectos y factores sintéticos como la contaminación. Los árboles estudiados fueron adultos jóvenes y sanos; *Abies religiosa* no es una especie susceptible al ataque de plagas o insectos (Manzanilla, 1974) y los factores meteorológicos se han descartado debido a que en los años que hubo una disminución del crecimiento, es decir, se presentaron anchos estrechos, las condiciones eran adecuadas para el crecimiento. Por lo tanto, se infiere que las disminuciones observadas se deben a la contaminación.

Bernal-Salazar *et al.* (2004) indicaron que la acumulación de la pared celular se asocia principalmente con la concentración de carbohidratos en el tejido de

almacenamiento, sin embargo, en sus estudios la escasez de estos fue una de las causas que contribuyeron al desarrollo de paredes traqueidales más estrechas en *Abies religiosa* en el Desierto de los Leones. Sus observaciones fueron similares con Gregory *et al.* (1986) y Torelli *et al.* (1986), quienes también reportaron escasez de carbohidratos en otras especies de árboles dañados por la contaminación. Alvarado *et al.* (1993) y Álvarez *et al.* (1998) reportaron clorosis y senescencia prematura de acículas en árboles *Abies religiosa* expuestos a contaminantes del aire el mismo sitio, lo cual reduce la actividad fotosintética. Por otro lado, Black (1982) y Mansfield y Freer-Smith (1984), han demostrado que los estomas pueden abrirse o cerrarse como resultado de la penetración de contaminantes. Por lo tanto, una reducción en la fotosíntesis puede causar una disminución en la actividad cambial y en el ancho anual.

Por lo anterior, se puede inferir que existen diversos factores en los que la contaminación atmosférica está contribuyendo al declive del bosque como ya se mencionó, está induciendo a los árboles a daños causados por las altas temperaturas, las cuales también aumenta. Además, está dañando la copa del árbol, lo que trae consigo cierre estomático, reducción de la capacidad fotosintética y por lo tanto de la producción de carbohidratos y hormonas de crecimiento; razones por la cuales se desencadena el deterioro de los bosques

Una descripción más detallada del proceso de inhibición del crecimiento a casusa de los contaminantes se observa en la figura 47.

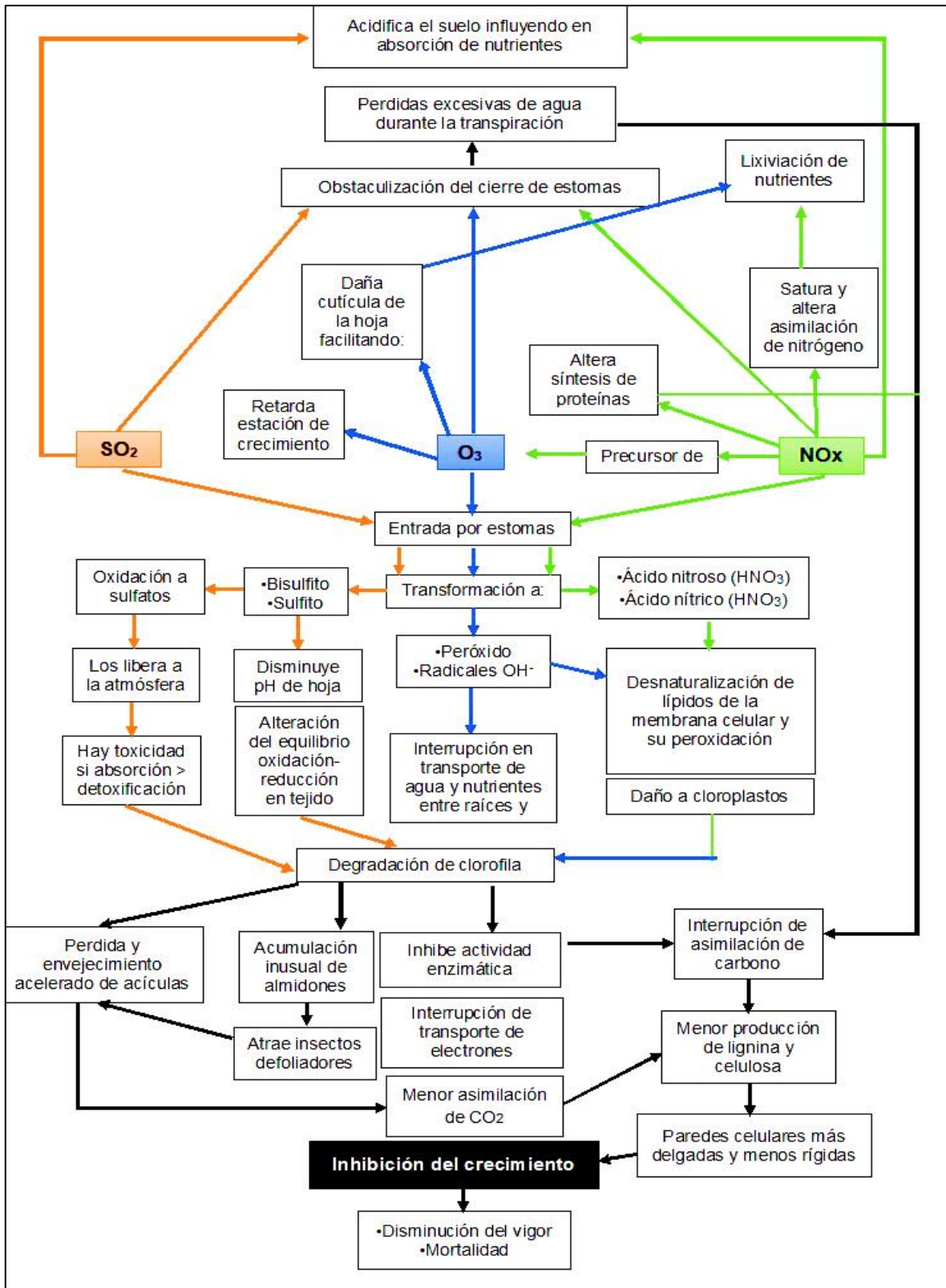


Figura 47. Proceso del daño fisiológico por contaminantes. (Integrado de Bobbink y Lamers, 2004; Cibrián *et al.*, 2007; Pallardy, 2008; Wei *et al.*, 2012 y Baciak *et al.*, 2015).

En el Parque Nacional Desierto de los Leones, los árboles de *Abies religiosa* presentan anillos anuales y medidas traqueidales de menor tamaño en comparación a lo que otros autores reportan para esta especie. Estas disminuciones afectan la vitalidad del árbol y por ende son un factor que contribuye al declive del bosque.

XI. CONCLUSIONES

Los anillos de crecimiento de oyamel en el Parque Nacional son estrechos considerando lo reportado (Flamand y Huerta 1964; Huerta, 1978). Los anchos anuales miden entre 0.92-5.47 mm, los de madera temprana 0.63-4.26 mm y para la madera tardía entre 0.26-1.21 mm; las ganancias anuales se encontraron entre 0.343-0.638 mm, ubicando al oyamel en un decaimiento medio.

Se obtuvieron anchos de lumen de 23.19-91.22 y de pared doble de 2.54-14.64 μm de madera temprana, medidas que superaron las reportadas por Flamand y Huerta (1964), sin embargo, más del 50% del total de todas las traqueidas, entre madera temprana y tardía, tienen un lumen menor a 40 μm , es decir, por debajo de la media de la medida del lumen reportada por esos autores.

Los contaminantes atmosféricos O_3 , NO_x y SO_2 provocan crecimientos menores de anillos y especialmente en la pared doble de las traqueidas del oyamel. Predisponiéndolos a otros agentes como el estrés hídrico y haciéndolos susceptibles a enfermedades, por lo cual está siendo una de las causas del deterioro del bosque, siendo el ozono el que más afecta las yemas apicales y laterales.

La temperatura máxima es el factor meteorológico que influye en la disminución del crecimiento, lo que significa que los oyameles se adaptan mejor ante temperaturas bajas.

El programa WinDENDRO™ es recomendable para la medición de anillos de crecimiento, ya que ayuda a medir el ancho temprano, tardío y total en cronologías

longevas y varias virutas. También permite manipular automática o manualmente el conteo de anillos e identificar las anomalías de los anillos.

El programa WinCELL™ es útil para hacer un conteo grande de células, sin embargo, presenta deficiencias para las lecturas directamente de los cortes de madera, por lo que es mejor complementarlo con otras técnicas.

XII. RECOMENDACIONES

Para trabajar el método descrito en este estudio es indispensable tener precisión en la orientación de las muestras para que estas queden de manera transversal al tronco del árbol. Así mismo, es importante realizar el pulido de las muestras hasta que se evidencien las traqueidas, con ello se facilita la identificación de las anomalías en los anillos de crecimiento, así como la observación de estas células.

El programa WinCELL™ presenta deficiencias para trabajar muestras directamente escaneadas de la madera, por lo cual si se trabaja de esta manera es recomendable complementar con otra técnica.

Por sus características *Abies religiosa* se recomienda para estudios de esta índole.

Hacen falta más estudios para conocer mejor los daños que la contaminación atmosférica está ejerciendo en el Desierto de los Leones y en general en los bosques de México.

XIII. REFERENCIAS

- Alarcón, M. A.; de Bauer, L. I.; Jasso, J.; Segura, G.; Zepeda, E. M. (1993). "Patrón de crecimiento radial en los árboles de *Pinus hartwegii* afectados por contaminación atmosférica en el suroeste del Valle de México". *Agrociencia*, 3, 67–80.
- Alvarado, R.; de Bauer, L.; Galindo, A. (1993). "Decline of sacred fir (*Abies religiosa*) in a forest Park south of Mexico City". *Environmental Pollution*, 80, 115-121.
- Alvarado-Rosales, D.; Hernández-Tejeda, T. (2002). "Decline of sacred fir in the Desierto de los Leones National Park". *In: Urban air pollution and forests: resources at risk in the Mexico City air basin*. Fenn M., Bauer, L.I.; Hernández, T. Springer-Verlag, N.Y.
- Álvarez, D.; Laguna, G.; Rosas, I. (1998). "Macroscopic and microscopic symptoms in *Abies religiosa* exposed to ozone in a forest near Mexico City". *Environmental Pollution*, 103, 251–259.
- Antonova, G. F. y Stasova, V. V. (1993). "Effects of environmental factor son wood formation in Scots pine stem". *Trees*, 7(4), 214-219.
- Ashby, W. C. y Fritts, H. C. (1972). "Tree growth, air pollution, and climate near Laporte, Indiana". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 53, 246-51.
- Baciak, M.; Warmi, Warmiński, K.; Bęś, A. (2015). "The effect of selected gaseous air pollutants on woody plants". *Forest Research Papers*, 46(4), 401-409.
- Barniak, J. y Krąpiec, M. (2016). "The Tree-Ring Method of Estimation of the Effect of Industrial Pollution on Pine (*Pinus sylvestris* L.) Tree Stands in the Northern Part of the Sandomierz Basin (SE Poland)". *Water Air and Soil Pollution*, 227, 166-176.
- Baucker, E.; Bemmann, A.; Bues, C. T.; Nuys, G. J. (1996). "Wood properties of heavily pollution damaged spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in the high-altitude zones of the eastern parts of Erzgebirge". *Holz Roh- Werkstoff*, 54, 251–258.

- Bauer, M. L. de. (1972). "Uso de plantas indicadoras de aeropolutos en la Ciudad de México". *Agrociencia*, 9(0), 139-141.
- Bernal-Salazar, S.; Terrazas, S. T.; Alvarado, D. (2004). "Impact of air pollution on ring width and tracheid dimensions in *Abies religiosa* in the Mexico City basin". *IAWA Journal*, 25(2), 205–215.
- Black, V. J. (1982). "Effects of sulphur dioxide on physiological process in plants". *Effects of Gaseous Air Pollutants in Agriculture and Horticulture*, 1, 67-91.
- Bobbink, R. y Lamers, L. M. P. (2004). *Skutki wzrostu depozycji azotu, in: Zanieczyszczenia powietrza a życie roślin*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa. 383 pp.
- Bytnerowicz, A.; Omasa, K.; Paoletti, E. (2007). "Integrated effects of air pollution and climate change on forests: A northern hemisphere perspective". *Environmental Pollution*, 147, 438–445.
- Calderón, G. C. de y Rzedowski, J. (2005). *Flora fanerogámica del Valle de México*. Instituto de Ecología, A.C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Pátzcuaro, Michoacán. 1406 pp.
- Cibrián, T. D. (1989). "Air Pollution and forest decline near México City". *Environmental Monitoring and Assessment*, 12, 49-58.
- Cibrián, T. D.; Alvarado, R. D.; García, D. S. (2007). *Enfermedades forestales en México*. Universidad Autónoma Chapingo. Estado de México. 585 pp.
- Cielsa, W. M. y Macías, S. J. (1987). "Desierto de los Leones. A forest in crisis". *American Forest*. November/ December.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (2019). Ficha de identificación de *Abies religiosa*. Obtenido de: http://www.conanp.gob.mx/conanp/dominios/iztapopo/documentos/fichas_de_especies/Abies_religiosa.pdf, consultado 02/02/2019.
- Comisión de Recursos Naturales (CORENA) (2000). Consultado en <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/secretaria/estructura/22>.
- CONANP-SEMARNAT (2006). *Programa de conservación y manejo Parque Nacional Desierto de los Leones*. SEPRIM México. 167 pp.

- Cook, E. y Innes, J. (1989). "Tree-ring analysis as an aid to evaluating the effects of air pollution on tree growth". En *Biologic Markers of Air-Pollution Stress and Damage in Forests*. National Academy Press. Washington.
- Cook E. R. y Kairiukstis, L. A. (1990). *Methods of Dendrochronology Applications in the Environmental Sciences*. Kluwer Academic Publishers. Netherlands. 351 p.
- Creber, G. T. y Chaloner, W. G. (1984). "Influence of environmental factors on the wood structure of living and fossil trees". *Botanical Review*, 50, 357– 448.
- Creus, J. y Puigdefábregas, J. (1976). "Climatología histórica y dendrocronología de *Pinus uncinata* Ramond. Cuadernos de investigación". *Geografía e historia*, 2(2), 17-30.
- Cropper, J. P. (1979) "Tree-ring skeleton plotting by computer". *Tree-Ring Bulletin*, 39, 47-60.
- De Kort, I. (1986). "Wood structure and growth ring width of vital and non vital Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) from a single stand in the Netherlands". *IAWA Bulletin n.s.*, 7, 309–318.
- De Kort, I. (1990). "Tracheid length in vital and non vital Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) in the Netherlands". *IAWA Bulletin n.s.*, 11, 203–209.
- Denne, M. P. (1988). "Definition of latewood according to Mork (1928)". *IAWA Bulletin n.s.*, 10(1), 59-62.
- Deslauriers, A.; Rossi, S.; Anfodillo, T. (2008). "Cambial phenology, wood formation and temperatura thresholds in two contrasting uears at high altitude in southern Italy". *Tree Physiology*, 28(6), 863-871.
- Dincer, F.; Muezzinoglu, A.; Elber, T. (2003). "SO₂ levels at forested mountains Izmir, Turkey and their possible source". *Water, Air, and Soil Pollution*, 147, 331–341.
- Dudley, N. y Stolton, S. (2014). "Air pollution and biodiversity: a review". Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/255650890>.
- Eckstein, D.; Grene, U.; Friiwood, A. (1981). "Anamiscvhe und mechanisch-technologische Untersuchungen am Holz einer SO₂-geschdigten Fichts und Tanne". *Holz als Rohund Werkstoff*, 39, 447-487.

- Eckstein, D.; Krause C.; Bauch, J. (1989). "Dendrochronological investigation of spruce trees (*Picea abies* (L.) Karst.) of different damage and canopy classes". *Holzforschung*, 43, 411–417.
- Fenn, M.; de Bauer, L.; Hernández-Tejeda, T. (2002). *Urban Air Pollution and Forests. Resources at Risk in the Mexico City Air Basin. Summary of Air Pollution Impacts on Forests in the Mexico City Air Basin*. Springer. Nueva York. 354 pp.
- Flamand R. J. L. y Huerta, C. J. (1964). "Contribución al conocimiento de *Abies religiosa* (H: B. K.) Schl. Et Cham., *Pinus montezumae* Lamb. y *Pinus hartwegii* Lindl." Inédito, México.
- Fritts, H. C. (1976). *Tree-rings and climate*. Academic. Londres. 576 pp.
- Fritts, H. C.; Smith, D. G.; Cardis, J. W.; Budelsky, C. A. (1965). "Tree-ring characteristics along a vegetation gradient in northern Arizona". *Ecology*, 46, 393–401.
- Giménez, A. M.; Moglia, J. G.; Hernández, P.; Gerez R. (2005). *Anatomía de madera*. Universidad Nacional de Santiago del Estero.
- Gindl, W.; Grabner, M.; Wimmer, R. (2000). "The influence of temperature on latewood lignin content in treeline Norway spruce compared with maximum density and ring width". *Trees*, 14(7), 409-414.
- Giraldo, J. J. (2010). "Dendrocronología en el trópico: aplicaciones actuales y potenciales". *Colombia forestal*, 14(1), 97-111.
- González, A. y Sánchez, V. M. (1961). *Los Parques Nacionales de México: Situación actual y problemas*. Ediciones del Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables, A. C. México.
- González-Medina, R. E.; Mendoza-Briseño, M.; Alvarado-Rosales D. (2010). "Exposición a ozono en relación a vitalidad en un bosque de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltl. & Cham.)". *Madera y Bosques*, 16(4), 7-19.
- Grant, W. B. (1996). *A brief overview of the effects of air pollution (acid deposition and ozone exposure) on trees and forests*. Forest List Server. Metla Finland.

- Gregory, R. A.; Williams, M. W.; Wong, B. L.; Hawley, G. L. (1986). "Proposed scenario for dieback and decline of *Acer saccharum* in Northeastern U.S.A. and Southeastern Canada". *IAWA Bulletin n.s.*, 7, 357–369.
- Grissino-Mayer, H. (2003). "A manual and tutorial for the proper use of an increment borer". *Tree-ring research*, 59(2), 63-69.
- Gutiérrez, G. G. (2003). *Análisis dendrocronológico y económico de Abies vejari, Pinus hartwegii, Pinus strobiformis y Pinus teocote en la Sierra de Peña Nevada, Nuevo León*. Tesis de Licenciatura. Nuevo León. 103 pp.
- Halbwachs, G. (1970). "Vergleichende Untersuchungen über die Wasserbewegung in gesunden und fluorgeschiedigten Holzgewachsen". *Cbl. Ges. Forstw*, 87, 1-2.
- Halbwachs, G. (1989). "Physiological responses to air pollutants". *Annales des sciences forestieres, INRA/EDP Sciences*, 46, 536-542.
- Hernández, T. T y de Bauer, L. I. (1984). "Evolución del daño por gases oxidantes en *Pinus hartwegii* y *P. montezumae* var. Lindlley en el Ajusco, D. F." *Agrociencias* 66, 71-82.
- Hernández, T. T. y Benavidez, M. H. (2018) "Sensibilidad de 20 procedencias de pino y oyamel a los oxidantes fotoquímicos". *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6 (30), 32-51.
- Hu, Y. y Sun, G. (2010). "Leaf nitrogen dioxide uptake coupling apoplastic chemistry, carbon/sulfur assimilation, and plant nitrogen status". *Plant Cell Reports*, 29, 1069–1077.
- Huerta, C. J. (1978). *Anatomía de la madera de 12 especies de coníferas mexicanas*. Dirección General de Investigación y capacitación forestales. México. 87 pp.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (2017). Boletín "Contaminación"; consultado en: www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/574/cap5.pdf., 25/01/2018.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2000). *XII Censo general de población y vivienda. Cuaderno Estadístico Delegacional No. 931765, Cuajimalpa de Morelos y Álvaro Obregón*. México.

- Jauregui, O. E. (1958). "El aumento de la turbiedad del aire en la Ciudad de México". *Revista Ingeniería Hidráulica en México*, 12(4), 9-18.
- Jáuregui, O. E. (1988). "Local wind and air pollution interaction in the Mexico basin". *Atmósfera*, 1, 131-140.
- Jáuregui O., E. (2002). "The climate of the Mexico City air basin: its effects on the formation and transport of pollutants". *En: Fenn M., Bauer; L. I.; Hernández-Tejeda, T. Urban air pollution and forests: resources at risk in the Mexico City air basin*. Springer-Verlag. New York. 86-117 pp.
- Jim, C. Y. y Chen, W. Y. (2008). "Assessing the ecosystem service of air pollutant removal by urban trees in Guangzhou (China)". *Journal of Environmental Management*, 88, 665–676.
- Karlsson, P. E.; Hansson, M.; Höglund, H. O.; Pleijel H. (2006). "Ozone concentration gradients and wind conditions in Norway spruce (*Picea abies*) forests in Sweden". *Atmospheric Environment*, 40, 1610–1618.
- Karolewski, P. (1992). "Ocena wrażliwości jedenastu gatunków z rodzaju *Pinus* na działanie SO₂, HF, NO₂ i O₃ w kontrolowanych warunkach". *Arboretum Kórnickie*, 37, 75–81.
- Kawakami, K. y I. Furukawa. (1992). "Horizontal variation of the annual ring width and the tracheid length in the declined pine trees". *Bulletin of Tottori University For.*, 21, 153–159.
- Khan, M. A.; Siddiqui, M. B.; Bhat, S.; Shahab, D. (2007). "Pollution Effect on the Cambial Structure of *Citrus reticulata* var. *tangelos*". *International Journal of Botany*, 3 (4), 342-350.
- Kienast, F. (1985). "Air pollution tree ring analysis, forest damage and air pollution in the Swiss Rhone Valley". *Land use policy*, 74-77.
- Klisz M. (2009). "Program WinCELL– narzędzie do analizy preparatów mikroskopowych komórek drewna. Leoene Prace Badawcze". *Forest Research Papers*, 70(3), 303-306.
- Larson, P. R. (1994). *The vascular cambium: development and structure*. Springer-Verlag. New York.

- Larsson, L. (2004). "Dendrochronology, curve matching and mathematics". Recuperado de: <http://cybis.se/forfun/dendro/newmath2/index.htm>.
- Liu, X.; Duan, L.; Mo, J.; Du, E.; Shen, J.; Lu, X.; Zhang, Y.; Zhou, X.; He, Ch.; Zhang, F. (2011). "Nitrogen deposition and its ecological impact in China: An overview". *Environmental Pollution*, 159, 2251–2264.
- Maas, F. M. (1987). *Responses of plants to sulphur containing air pollutants (H₂S and SO₃)*. Drukkerij can Dendeven B. V. Groningen. The Netherlands.
- Malik, I.; Wistuba, M.; Danek, M.; Danek, T.; Krąpiec, M. (2011). "Wpływ emisji zanieczyszczeń atmosferycznych przez Zakłady Chemiczne w Tarnowskich Górach (północna część Wyżyny Śląskiej) na szerokość przyrostów rocznych sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.)". *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 47, 9–21.
- Malik, I.; Danek, M.; Marchwinska-Wyral, E.; Danek, T.; Wistuba, M.; Krąpiec, M. (2012). "Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Growth suppression and adverse effects on human health due to air pollution in the Upper Silesian Industrial District (USID), Southern Poland". *Water, Air and Soil Pollution*, 223, 3345-3364.
- Mansfield, T. A. y Freer-Smith, P. H. (1984). "The role of stomata in resistance mechanism". *Gaseous Air Pollutants and Plant Metabolism*, 1, 131-141.
- Manual WinCELL™ (2001) for wood cell analysis. Regent Instruments. Canadá Inc.
- Manual WinDENDRO™ (2003). Regent Instruments. Canadá Inc.
- Manzanilla, H. (1974). *Investigaciones Epidométricas y silvícolas en bosques mexicanos de Abies religiosa*. Dirección General de Información y Relaciones Públicas de la SAG. México.
- Martínez, M. (1963). *Las pináceas mexicanas*. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 400 pp.
- Matalas, N. C. y Rosenblatt, J. R. (1962) "Use of correlation for augmenting autocorrelated streamflow information" *U.S. Geol. Survey Water Supply Paper*.
- Matyssek, R.; Wieser, G.; Calfapietra, C.; de Vries, W.; Dizengremel, P.; Ernst, D.; Jolivet, J.; Mikkelsen, T. N.; Mohren, G. M. J.; Le Thiec, D.; Tuovinen, J. P.;

- Weatherall, A.; Paoletti, E. (2012). "Forest under climate change and air pollution: Gaps in understanding and future directions for research". *Environmental Pollution*, 160, 57–65.
- McClenahan, J. R. y Long, R. P. (1995). "Variability in oak forest herb layer communities".
 - Miś, R. (1995). "Wpływ przemysłowych zanieczyszczeń powietrza na wzrost wysokości i jakość sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.)". *Sylwan*, 139(1), 87–97.
 - Mork (1928). "Die Qualität des Fichtenholzes unter besonderer Rücksichtnahme auf Schleif- und Papierholz". *Der Papier-Fabrikant*, 26, 741-747.
 - Muzika, R. M.; Guyette, R. P.; Zielonja, T.; Libhold, A. M. (2004). "The influence of O₃, NO₂ and SO₂ on growth of *Picea abies* and *Fagus sylvatica* in the Carpathian Mountains". *Environmental Pollution*, 130, 65-71.
 - Nieweglowska-Guzik, B. (1995). "Cytological and anatomical changes in pine tree xylem caused by sulphur compounds". *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 64, 233–238.
 - Noe, S. M.; Kimmel, V.; Hüve, K.; Copolovici, L.; Portillo-Estrada, M.; Ülle Püttsepp, Ü.; Jõgiste, K.; Niinemets, Ü.; Hörtnagl, L.; Wohlfahrt, G. (2011). "Ecosystem-scale biosphere–atmosphere interactions of a hemiboreal mixed forest stand at Järvselja, Estonia". *Forest Ecology and Management*, 262, 71–81.
 - Pallardy, S. G. (2008). *Physiology of woody plants*. Academic Press. Nueva York. 454 pp.
 - Paoletti, E.; Schaub, M.; Matyssek, R.; Wieser, G.; Augustaitis, A.; Bastrup-Birk, A. M.; Bytnerowicz, A.; Günthardt-Goerg, M. S.; Müller-Starck, G.; Serengil, Y. (2010). "Advances of air pollution science: From forest decline to multiple-stress effects on forest ecosystem services". *Environmental Pollution*, 158, 1986–1989.

- Paz, E. D. (1989). Sistema de calificación de riesgo para estimar la muerte de oyamel (*Abies religiosa* Schl et. Cham) en el Parque “Desierto de los Leones” D.F. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo, México.
- Rathgeber, C. B. K.; Cuny, H. E.; Fonti, P. (2016). “Biological basis of tree-ring formation: a crash course”. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1-7.
- Raven, P. H.; Evert, R. F.; Eichhorn, S. E. (1991). *Biología de las plantas*. Reverté. Barcelona. 392 pp.
- Red Automática de Monitoreo Atmosférico, consultada en <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aKBh%27>, 06/01/2018.
- Rennenberg, H. y Herschbach, C. (1996). *Response of Plant to Atmospheric Sulphur*. En: *Plant responses to air Pollution*. John Wiley and Sons. Nueva York. 293 pp.
- Rossi, S.; Deslauriers, A.; Anfodillo, T.; Carrer, M. (2008). “Age-dependent xylogenesis in timberline conifers”. *New Phytologist*, 177(1), 199-208.
- Rowell, R. M. (2005). *Handbook of Wood chemistry and wood composites*. CRC Press. USA. 472 pp.
- Schaub, M.; Skelly, J. M.; Zhang, J. W.; Ferdinand, J. A.; Savage, J. E.; Stevenson, R. E.; Davis, D. D.; Steiner, K. C. (2005). “Physiological and foliar symptom response in the crowns of *Prunus serotina*, *Fraxinus americana* and *Acer rubrum* canopy trees to ambient ozone under forest conditions”. *Environmental Pollution*, 133, 553–567.
- Schmitt, U.; Grünwald, C.; Gricar J.; Koch, G.; Cufar, K. (2003). “Wall structure of terminal latewood tracheids of healthy and declining silver fir trees in the Dinaric region, Slovenia”. *IAWA Journal*, 24, 41–51.
- Schweingruber F. H. (1988). *Tree Rings. Basics and Applications of Dendrochronology*. D. Reidel Pub. Co., Dordrecht.
- Schweingruber, F. H. y Voronin, V. (1996). “A study of the dendrochronology and soil chemistry of the forest damage area at Norilsk, Siberia, and consequences for the interpretation of large-scale crown assessment inventories”. *Allg. Forst u. Jagdzeit*, 167, 53–67.

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2006). DOF Desierto de los Leones. México, D.F.
- Segala, A. E. (1995). "The effects of the pollution on wood of *Cecropia glazioui* (Cecropiaceae)". *IAWA Journal*, 16, 69–80.
- Sha, Ch.; Wang, T.; Lu, J. (2010). "Relative Sensitivity of Wetland Plants to SO₂ Pollution". *Wetlands*, 30, 1023–1030.
- Silkin, P. P. y Kirdyanov, A. V. (2003). "The relationship between variability of cell wall mass of earlywood and latewood tracheids in larch tree-rings, the rate of tree-ring growth and climate changes". *Holzforschung*, 57(1), 1-7.
- Simpson, D.; Butterbach-Bahl, K.; Fagerli, H.; Kesik, M.; Skiba, U.; Tang S. (2006). "Deposition and emissions of reactive nitrogen over European forests: A modelling study". *Atmospheric Environment*, 40, 5712–5726.
- Sistema Meteorológico Nacional, consultado en <https://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>, 06/01/2018).
- Smith, W. H. (1981). *Air Pollution and Forests, Interactions Between Air Contaminants and Forest Ecosystems*. Springer-Verlag. New York.
- Song, Y-J.; Kim Y-D.; Choi K-R. (2009). "Estimation of the effects of air pollutants in tree ring growth in black pines (*Pinus thunbergii*)". *Journal of Ecology and Field Biology*, 32(2), 109-113.
- Stokes, M. A. y Smiley, T. L. (1996). *An introduction to tree-ring dating*. The University of Arizona Press. Tucson, Arizona. 73 pp.
- Terrazas, T. y Bernal-Salazar, S. (2002). *Histological Symptoms of Air Pollution Injury in Foliage, Bark, and Xylem of Abies religiosa in the Basin of Mexico*. In: Fenn, M. E.; de Bauer, L. I.; Hernández-Tejeda; T. *Urban Air Pollution and Forests. Ecological Studies (Analysis and Synthesis)*. Springer. New York. 261-262 pp.
- Thompson, M. A. (1981). "Tree rings and air pollution: a case study of *Pinus monophyla* growing in East-Central Nevada". *Environmental Pollution*, 26, 251-266.

- Tolunay, D. (2003). "Air pollution effects on annual ring widths of forest trees in mountainous land of Izmir (Turkey)". *Water, Air and Soil Pollution, Focus*, 3, 227-242.
- Torelli, N.; Cufar, K.; Rovic, D. (1986). "Some wood anatomical, physiological and silvicultural aspects of silver fir dieback in Slovenia (NW Yugoslavia)". *IAWA Bulletin n.s.*, 7, 343–351.
- Vaganov E. A.; Hughes M. K.; Shashkin A. V. (2006). *Growth Dynamics of Conifer Tree Rings: Images of Past and Future Environments*. Springer. Alemania. 351 pp.
- Vargas, M. F. (1997). *Parques nacionales de México*. SEMARNAT. México D.F. 759 pp.
- Villanueva, D. J.; Cerano, P. J.; Stahle, D. W.; Therrel, M. D.; Cleaveland, M. K.; Sánchez, C. I. (2004). *Elementos básicos de la dendrocronología y sus aplicaciones en México*. CENID-RASPA. México. 37 pp.
- Wagg, S.; Mills, G.; Hayes, F.; Wilkinson, S.; Cooper, D.; Davies, W. J. (2012). "Reduced soil water availability did not protect two competing grassland species from the negative effects of increasing background ozone". *Environmental Pollution*, 165, 91–99.
- Wei, X.; Blanco, J. A.; Jiang, H.; Kimmins J. P. H. (2012). "Effects of nitrogen deposition on carbon sequestration in Chinese fir forest ecosystems". *Science of the Total Environment*, 416, 351–361.
- Weinstein, D. A.; Laurence, J. A.; Retzlaff, W. A.; Kern, J. S.; Lee, E. H.; Hogsett, W. E.; Webera J. (2005). "Predicting the effects of tropospheric ozone on regional productivity of ponderosa pine and white fir". *Forest Ecology and Management*, 205, 73–89.
- Wimmer, R.; Grabner, M.; Schäy, E.; Halbwachs, G. (1996). "How useful is xylem anatomy as an indicator for SO₂ pollution?". *IAWA Journal*, 17, 266–267.
- Wimmer, R. y Grabner, M. (2000). "A comparison of tree-ring features in *Picea abies* as correlated with climate". *IAWA Journal*, 21(4), 403-416.
- Wodzicki, T. J. (2001). "Natural factors affecting wood structure". *Wood Science and Technology*, 35(1-2), 5-26.

- Wodzicki, T. J. y Zajaczkowski, S. (1983). "Variation of seasonal cambial activity and xylem differentiation in a selected population of *Pinus sylvestris* L. Folia". *Forestalia Polanica Series A*, 25, 5-23
- Wu, Z.; Wang, X.; Chen, F.; Turnipseed, A. A.; Guenther, A. B.; Niyogi, D.; Charusombat, U.; Xia, B.; Munger, W. J.; Alapaty, K. (2011). "Evaluating the calculated dry deposition velocities of reactive nitrogen oxides and ozone from two community models over a temperate deciduous forest". *Atmospheric Environment*, 45, 2663–2674.
- Xu, J.; Lu, J.; Evans, R.; Downes, G. M. (2014). "Relationship between Ring Width and Tracheid Characteristics in *Picea crassifolia*: Implication in Dendroclimatology". *BioResources*, 9(2), 2203-2213.
- Yasue, K.; Funada, R.; Fukazawa, K.; Otani, J. (1996). "The effect of climate on the variation in maximum density of *Picea glehnii* Mast. and associated changes in tracheid dimensions". *Dendrochronologia*, 14, 89–97.
- Yunus, M. y Iqbal, M. (1996). *Plant response to air pollution*. John Wiley & Sons.
- Zapletal, M.; Cudlín, P.; Chroust P.; Urban, O.; Pokorný, R.; Edwards-Jonášová, M.; Czerný, R.; Janouš, D.; Taufarová, K.; Večeřa, Z.; Mikuška, P.; Paoletti E. (2011). "Ozone flux over a Norway spruce forest and correlation with net ecosystem production". *Environmental Pollution*, 159, 1024–1034.
- <https://es.slideshare.net/franagui/desierto-de-los-leones>, consultado 18/01/19.

XIV. ANEXOS

14.1 Promedios anuales de SO₂, O₃ y NO_x (ppb).

Datos de la estación Pedregal.

AÑO	NO _x	O ₃	SO ₂
1986	65.7	54.6	35.8
1987	54.3	45.7	35.3
1988	45.9	54.0	33.2
1989	43.1	42.3	27.3
1990	78.4	53.2	50.3
1991	53.2	64.2	55.8
1992	58.4	61.2	44.2
1993	70.0	51.5	12.9
1994	64.0	49.6	14.5
1995	54.1	49.0	13.7
1996	62.8	45.2	12.0
1997	58.8	43.5	10.1
1998	44.4	43.5	10.3
1999	40.8	44.3	11.3
2000	42.5	43.4	9.5
2001	43.4	33.6	14.4
2002	32.5	39.9	7.1
2003	48.5	34.4	8.0
2004	48.0	30.6	8.5
2005	46.0	36.0	8.5
2006	40.8	35.5	5.7
2007	37.3	33.9	4.3
2008	36.3	33.1	6.3
2009	34.2	33.3	4.0
2010	34.6	31.3	4.7
2011	34.3	33.8	4.3
2012	39.3	30.7	5.1
2013	37.3	31.2	4.5
2014	36.6	28.7	3.7
2015	34.5	31.8	4.0

Datos obtenidos de: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aKBh%27>

14.2 Promedios anuales de temperaturas y precipitación.

Datos de la estación Desierto de los Leones complementados con El Guarda.

AÑO	T° MÍNIMA (°C)	T° MÁXIMA (°C)	PRECIPITACIÓN (mm)
1961	4.9	18.4	101.1
1962	4.6	19	72.9
1963	4.8	18	112.5
1964	5.1	17.9	103.5
1965	4.5	17.7	112.7
1966	4.4	17.6	97.9
1967	4.3	17	128
1968	3.7	16.7	112.7
1969	4.1	18	130.8
1970	3.8	17.3	99.4
1971	3.5	16.9	130.6
1972	4.7	16.3	107.8
1973	4.6	17.3	126.4
1974	3.7	16.7	85.4
1975	4.6	17.5	103.6
1976	4.2	16.6	123.7
1977	4.3	16.8	93.2
1978	4.9	16.4	94.6
1979	4.3	17	95.5
1980	4.1	14.2	102.1
1981	3.9	13.1	138.5
1982	4.5	16.6	96.9
1983	4.9	17.8	107.5
1984	5.3	17.2	141.6
1985	5	16.7	126
1986	5	17.6	109.1
1987	6	18.3	122.6
1988	5.3	14.1	123.5
1989	7.0	20.7	71.9
1990	5.0	13.8	239.4
1991	6.5	17.1	91.1
1992	8.1	22.4	74.2
1993	5.2	13.9	220.9
1994	8.0	23.8	112.4
1995	8.7	23.8	59.3
1996	5.0	14.2	91.3

1997	4.9	13.1	134.7
1998	4.7	14.5	218.1
1999	4.9	12.7	124.8
2000	5.1	12.8	161.2
2001	4.8	12.5	134.5
2002	4.9	12.9	111.7
2003	5.0	12.9	122.9
2004	5.1	13.0	180.2
2005	5.1	13.7	143.5
2006	5.1	13.2	214.8
2007	5.1	13.4	124.8
2008	4.9	12.9	97.3
2010	4.4	21.6	136.3
2011	10.8	24.6	98.59
2012	11.5	25.6	49.93
2013	11.8	22.3	199.3
2014	5.2	15.0	136.6
2015	5.6	16.1	108.9

Datos obtenidos de: <https://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>

14.3 Análisis multifactorial del crecimiento de los anillos

Análisis de Varianza para CREC. TARDÍO - Suma de Cuadrados Tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
COVARIABLES					
CREC. TOTAL	1.22844	1	1.22844	186.26	0.0000
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:ETAPAS	0.102296	4	0.0255739	3.88	0.0082
RESIDUOS	0.323166	49	0.00659522		
TOTAL (CORREGIDO)	3.30318	54			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Análisis de Varianza para CREC. TEMPRANO - Suma de Cuadrados Tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
COVARIABLES					
CREC. TOTAL	14.1109	1	14.1109	2214.82	0.0000
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:ETAPAS	0.098726	4	0.0246815	3.87	0.0082
RESIDUOS	0.312185	49	0.00637112		
TOTAL (CORREGIDO)	39.6778	54			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual